



СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ  
Российской Академии Наук



## **XI Всероссийская научная конференция**

**«СИСТЕМНЫЙ СИНТЕЗ И ПРИКЛАДНАЯ СИНЕРГЕТИКА»**

Сборник научных работ

**2022**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Южный федеральный университет  
Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук  
Северо-Кавказский федеральный университет  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)

---

**XI Всероссийская  
научная конференция**

**«СИСТЕМНЫЙ СИНТЕЗ И ПРИКЛАДНАЯ СИНЕРГЕТИКА»**

*Сборник научных работ*

27 сентября – 01 октября 2022 г.  
пос. Нижний Архыз

Ростов-на-Дону – Таганрог  
Издательство Южного федерального университета  
2022

УДК 52:681.5(063)  
ББК 22.63+32.965я431  
О 42

- О42 XI Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»:  
сборник научных трудов (п. Нижний Архыз, Россия 27 сентября – 01 октября 2022 г.);  
Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного  
федерального университета, 2022. – 436 с.

ISBN 978-5-9275-4337-3

В сборник включены доклады, представленные в рамках XI-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (ССПС-2022). Основными направлениями работы конференции являются: проблемы самоорганизации и управления в сложных технических системах; интеллектуальная обработка информации; информационная безопасность; искусственный интеллект в управлении: теория и практика; управление системами с распределенными параметрами; математическое моделирование в астрофизике, геофизике и инженерных науках; тенденции и технологии подготовки инженерных кадров.

Сборник трудов адресуется научным сотрудникам, преподавателям университетов, аспирантам и магистрантам, интересующимся междисциплинарными нелинейными проблемами прикладной синергетики, системного синтеза, науки управления и обработки информации.

*Публикуется в авторской редакции.*

ISBN 978-5-9275-4337-3

УДК 52:681.5(063)  
ББК 22.63+32.965я431  
© Южный федеральный университет, 2022

**Организационный комитет XI Всероссийской научной конференции  
«Системный синтез и прикладная синергетика»**

**Сопредседатели:**

*Власюк В.В.*, Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук;

*Шевченко И.К.*, Южный федеральный университет;

*Шелудько В.Н.*, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

**Члены организационного комитета:**

*Веселов Г.Е.*, Южный федеральный университет;

*Доргушаова А.К.*, Майкопский государственный технологический университет;

*Заковоротный В.Л.*, Донской государственный технический университет;

*Кайсина Е.И.*, Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук;

*Ляпунцова Е.В.*, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана;

*Першин И.М.*, Северо-Кавказский федеральный университет;

*Петренко В.И.*, Северо-Кавказский федеральный университет;

*Рапопорт Э.Я.*, Самарский государственный технический университет.

**Программный комитет XI Всероссийской научной конференции  
«Системный синтез и прикладная синергетика»**

**Почетный председатель:**

*Балега Ю.Ю.*, Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук.

**Сопредседатели:**

*Веселов Г.Е.*, Южный федеральный университет;

*Желенкова О.П.*, Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук;

*Першин И.М.*, Северо-Кавказский федеральный университет;

*Шестopalов М.Ю.*, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

**Зам. председателя:**

*Самойлов А.Н.*, Южный федеральный университет;

**Члены программного комитета:**

*Абрамов Е.С.*, Южный федеральный университет;

*Аджиев А.Х.*, Высокогорный геофизический институт;

*Ачарова И.А.*, Южный федеральный университет.

*Воробьев Е.Г.*, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина);

*Горбунов А.В.*, Южный федеральный университет;

*Дилигенская А.Н.*, Самарский государственный технический университет;

*Душин С.Е.*, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина);

*Ищукова Е.А.*, Южный федеральный университет;

*Куповых Г.В.*, Южный федеральный университет;

*Линец Г.И.*, Северо-Кавказский федеральный университет;

*Лукьянов А.Д.*, Донской государственный технический университет;

*Лызь Н.А.*, Южный федеральный университет;

*Мещеряков Р.В.*, Институт проблем управления РАН;

*Первухин Д.А.*, Санкт-Петербургский горный университет;

*Попов А.Н.*, Южный федеральный университет;

*Тебуева Ф.Б.*, Северо-Кавказский федеральный университет;

*Тищенко Е.Н.*, Ростовский государственный экономический университет (РИНХ);

*Целых А.А.*, Южный федеральный университет;

*Чернышев А.Б.*, Северо-Кавказский федеральный университет;

*Щукин Г.Г.*, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Попов А. Н.</b>	
20 лет кафедре синергетики и процессов управления Южного федерального университета.....	9
<b>Секция I. ПРОБЛЕМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ</b>	
<b>Андреев А.В., Грудяева Е.С., Душин С.Е.</b>	
Исследование биологической очистки на предприятии «ИДАВАНГ Агро» по компьютерным моделям .....	16
<b>Ключкова В.Г., Панчук В.Е.</b>	
Проект ГРАФО – первый шаг на пути к САО АН СССР .....	22
<b>Ефимов Н.Н., Тырникова Ю.В., Дьяконов Е.М.</b>	
Влияние аккумулирующих способностей элементов котла на температуру рабочей среды.....	28
<b>Веселов Г.Е., Ингабире А.</b>	
Комбинированный метод синергетического синтеза законов управления пространственным движением БПЛА с жестким крылом в условиях ветровых возмущений .....	31
<b>Ковалёв Д.А., Русинов Л.А., Куркина В.В.</b>	
Разработка диагностической модели для подсистем содорегенерационного котлоагрегата .....	40
<b>Кузьменко А.А.</b>	
Синергетический подход к синхронизации хаотических систем Арнеодо: сравнение закона управления с форсированным скользящим режимом и закона с интегральной адаптацией .....	44
<b>Олейников К.А.</b>	
Синергетическое управление энергосистемой электромобиля.....	51
<b>Попов И.А.</b>	
Синергетический синтез автопилота для управления движением самолета-амфибии Бе-200ЧС при заборе воды.....	55
<b>Санкин А.В., Алтухов В.И.</b>	
Модель высоты барьера Шоттки как функция управляемого состава х для твердых растворов SiC .....	61
<b>Скляров С.А., Веселов Г.Е.</b>	
Методы преобразования и распределения энергии при использовании альтернативных источников.....	64
<b>Комаров В.В., Драбек С.В., Емельянов Э.В., Шергин В.С., Фокин М.Ю., Шалдырван И.В.</b>	
Разработка новых систем управления на 1м телескопе Цейсс-1000.....	68
<b>Комаров В.В., Фокин М.Ю., Шалдырван И.В.</b>	
3D мониторинг небесной полусфера в окрестности крупнейшего российского телескопа БТА САО РАН .....	72
<b>Комаров В.В., Шалдырван И.В., Фокин М.Ю.</b>	
Создание высокочувствительных IP камер на основе CMOS матриц для on-line мониторинга ночного неба.....	77
<b>Юшкин М.В., Шалдырван И.В., Фокин М.Ю.</b>	
Лабораторная установка для исследования свойств оптических волокон.....	82
<b>Ледерер П.А., Кочубей Д.С.</b>	
Сравнительный анализ вертикальных ветротурбин .....	87

## Секция II. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

<b>Muthanna Mohammed Saleh Ali, Tselykh Alexey</b>		
Toward an Ultra-Low Latency Based Q-learning Assisted 6TiSCH Network in Smart Industries .....	91	
<b>Silega Martinez Nemury, Rogozov Yu.I., Lapshi V.S.</b>		
Towards a Software Development Process Based on Ontologies .....	96	
<b>Вагизов М.Р.</b>		
Интеллектуальное геомоделирование лесных экосистем.....	101	
<b>Власенко С.В.</b>		
Представление схем реляционных баз данных на основе применения нотаций концептуальных графов .....	104	
<b>Кузенков А.Н., Федосин С.А., Моисеев С.С.</b>		
Прогнозирование нештатных ситуаций в технологическом процессе помола цемента.....	110	
<b>Лихтин С.С.</b>		
Подбор оптимальных параметров 3D печати по технологии Fused Filament Fabrication с использованием технологий компьютерного зрения .....	115	
<b>Самойлов А.Н., Костюк А.И.</b>		
Разворачивание БД системы охраны периметра .....	119	
<b>Ямашкин С.А., Ямашкин А.А., Федосин С.А., Моисеев С.С.</b>		
Анализ, обработка и управление информацией в инфраструктурах пространственных данных.....	124	
<b>Полянский И.С., Логинов К.О.</b>		
К вопросу оценки интенсивности межличностной коммуникации пользователей социальной сети .....	132	
<b>Федотова А.Ю., Самойленко В.С.</b>		
Модели управления проектными командами .....	136	
<b>Рындин А.В.</b>		
Методика оценки эффективности передачи многомодальной информации .....	139	
<b>Назаренко А.Ф., Глаголевский Ю.В.</b>		
Программа интерактивной визуализации магнитных и электрических полей.....	145	

## Секция III. ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<b>Абрамов Е.С., Геворгян Р.А.</b>		
Построенное онтологической модели компьютерного преступления .....	147	
<b>Лившиц М.В., Шестопалов М.Ю.</b>		
Обеспечение информационной безопасности при проектировании инфокоммуникационных систем.....	154	
<b>Басан Е.С., Прошкин Н.А.</b>		
Разработка тестовых стендов киберфизических систем для анализа безопасности .....	159	
<b>Мнухин В.Б.</b>		
Защита изображений на основе преобразования Мёбиуса на конечных гауссовых полях .....	166	
<b>Басан А.С., Басан Е.С., Иванникова Т.Н., Корчаловский С.В., Михайлова В.Д., Шулика М.Г.</b>		
Концепция базы знаний угроз киберфизических систем на основе онтологического подхода.....	172	

<b>Величко А.М., Сакс В.В., Витковский В.В., Марухно А.С., Яковенко А.В., Малькова Г.А., Желенкова О.П.</b>	
Оптимизация потоков данных в контексте обеспечения безопасности телекоммуникационной сети САО РАН.....	178
<b>Басан Е.С., Михайлова В.Д., Шулика М.Г.Лесников А.А., Могильный А.Б.</b>	
Определение набора метрик для детектирования атак на КФС .....	183

**Секция IV. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В УПРАВЛЕНИИ:  
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА**

<b>Непомнящий А.В.</b>	
Философия искусственного интеллекта в свете мировых универсалий .....	190
<b>Коргин Н.А., Мещеряков Р.В.</b>	
Концепция проекта по созданию распределенной сети полигонов для отработки сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях.....	197
<b>Кирилов А.Э., Черный К.А.</b>	
Основные концептуальные решения по структуре цифровых двойников объектов газотранспортной системы .....	203
<b>Елькин Д.М., Лихтин С.С., Кондратов В.С.</b>	
Разработка среды для тестирования системы управления транспортными потоками.....	207
<b>Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.</b>	
Система автономного интеллектуального управления средней группой роботов .....	210
<b>Ылдаева М.А., Карманцева А.П.</b>	
Система управления движением автономного транспорта на основе методов машинного обучения .....	215

**Секция V. УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

<b>Першин И.М., Носова В.А., Малков А.В.</b>	
Проектирование распределенных систем управления с использованием результатов экспериментальных исследований.....	218
<b>Абрамкин С.Е., Душин С.Е.</b>	
Комплексный алгоритм управления технологическими процессами в газовой промышленности .....	224
<b>Афанасьев И.А.</b>	
Системы с согласно-параллельной коррекцией и оптимальное управление .....	231
<b>Дилигенская А.Н., Золотарёва В.В.</b>	
Параметрическая идентификация процессов технологической теплофизики с двумя неизвестными характеристиками .....	236
<b>Зайцев С.В., Жерносек И.А.</b>	
Синтез и адаптация регулятора для многомерного объекта.....	241
<b>Илюхин А.А., Тимошенко Д.В.</b>	
Задачи управления и наблюдения конформационной динамикой молекул ДНК .....	244
<b>Мясникова Е.В., Чернышев А.Б., Цаплева В.В.</b>	
Методика применения обобщенных критериев устойчивости для класса пространственно-инвариантных систем.....	251
<b>Ляпунова И.А., Таран А.Е., Фоменко Н.А.</b>	
Об одной функции управления в модели динамики биомассы фитопланктона.....	255
<b>Самойлов А.Н., Онищенко С.В., Козловский А.В., Гарягдыев А.М.</b>	
Исследование современных подходов и разработка алгоритма для бесконтактного измерения геометрических параметров объектов на цифровом изображении.....	261

**Секция VI. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
В АСТРОФИЗИКЕ, ГЕОФИЗИКЕ И ИНЖЕНЕРНЫХ НАУКАХ**

<b>Душин С.Е., Шпаковская И.И., Графина О.А.</b>	
Математическая модель управляемого роста опухолевых клеток.....	267
<b>Белоусова О.В., Куповых Г.В., Клово А.Г., Гриццов В.В.</b>	
Применение методов математического моделирования в задачах атмосферной электродинамики .....	274
<b>Тамаров В.А., Таволжанская А.С., Панчук В.Е.</b>	
О низкочастотных колебаниях звёздных изображений на 6 метровом телескопе БТА .....	279
<b>Колесникова С.И., Кустова Е.В.</b>	
Моделирование воздействия на стохастический объект иммунологии .....	282
<b>Панчук А.В., Якшина Т.А.</b>	
К истории отечественных исследований земной атмосферы астрономическими методами .....	288
<b>Михайловский Ю.П., Синьевич А.А., Веремей Н.Е., Торопова М.Л., Куров А.Б., Довгалюк Ю.А.</b>	
О верификации нестационарных численных моделей конвективных облаков на результатах экспериментальных радиофизических исследований в Северо-Западном регионе России.....	293
<b>Закинян А.Р., Панчук А.В.</b>	
Атмосферная турбулентность и потери света при спектроскопии астрономических объектов.....	300
<b>Морозов В.Н., Зайнетдинов Б.Г., Заников В.В.</b>	
Влияние аэрозольных частиц на глобальную электрическую цепь.....	304
<b>Ашабоков Б.А., Лесев В.Н., Тумгоева Х.А., Шаповалов В.А.</b>	
Некоторые результаты исследований роли взаимодействия процессов в конвективных облаках в формировании их макро- и микроструктурных характеристик.....	310
<b>Куповых Г.В., Клово А.Г., Илюхин А.А.</b>	
Применение обобщенных тригонометрических систем в спектральных задачах.....	315
<b>Бажанов Н.Н., Сухинин В.В., Богданов В.П.</b>	
Модифицированная ланчестерская модель как главный элемент мониторинга возможного ущерба.....	321
<b>Белоусова О.В., Чумак М.И., Клово А.Г., Куповых Г.В.</b>	
Методы численного моделирования применительно к задачам электродинамики атмосферы .....	325
<b>Болгов Ю.В.</b>	
Математическая модель динамики снежных лавин на основе клеточных автоматов .....	331
<b>Семенистый В.В., Гамолина И.Э.</b>	
Параллельная модель решения класса задач обтекания сверхкритических крыловых профилей воздушным потоком .....	336
<b>Жуков А., Бутенков С.А., Нагоров А.Л.</b>	
Вычислительная реализация методов применения дробных операторов при обработке изображений.....	341
<b>Аджиев А.Х., Керефова З.М.</b>	
Статистический анализ данных о грозовой активности на Северном Кавказе .....	345
<b>Клово А.Г., Куповых Г.В., Гончаров А.В.</b>	
Оптимизация разностных схем в задачах управления гиперболическими уравнениями .....	350
<b>Тимошенко Д.В., Кудринская Т.В., Клово А.Г., Куповых Г.В.</b>	
Моделирование структуры приземного электрического поля и расчет коэффициента редукции вблизи неоднородной поверхности.....	355

<b>Ляпунова И.А., Фоменко Н.А.</b>		
Об одной модификации модели боевых действий .....		360
<b>Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г., Ростокина Е.А., Матюков М.А.</b>		
Оптимизация конструкции модового разделителя СВЧ радиометрической системы на основе его электродинамического моделирования .....		366
<b>Ляпунова И.А., Таран А.Е.</b>		
Математическое моделирование распространения планктона под влиянием его генотипа .....		370
<b>Ляшенко А.Л.</b>		
Математическая модель тепловых процессов в двухфазных потоках теплоносителей .....		377
<b>Вдовин В.Ф., Марухин А.С.</b>		
Перспективы строительства субтерагерцового радиотелескопа на Северном Кавказе.....		381
<b>Верич Ю.Б., Панчук В.Е., Юшкин М.В.</b>		
Аппаратурно-методическое обеспечение наблюдений звезд с высоким спектральным разрешением.....		384
<b>Исаев А.В., Калачев Д.П.</b>		
Разработка картографического приложения для оптимального размещения объектов социальной инфраструктуры .....		387

#### **Секция VII. ТЕНДЕНЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ**

<b>Непомнящий А.В.</b>		
Подготовка инженеров: цели и концепции .....		393
<b>Лызь Н.А., Лызь А.Е.</b>		
Цифровые технологии в обучении цифрового поколения: проблемы личностно-профессионального развития ИТ-студентов.....		402
<b>Эксакусто Т.В., Иванцов Е.В.</b>		
Эмоциональный интеллект студентов: особенности и возможности развития.....		410
<b>Истратова О.Н., Голубева А.С.</b>		
Оптимизм как фактор психологического здоровья студентов-первокурсников .....		417
<b>Боровков Д.П., Сидякин П.А., Щитов Д.В.</b>		
Разработка инженерного калькулятора для обучения подбору пылеулавливающего оборудования аспирационных систем .....		424
<b>Величко С.В.</b>		
Аспекты реализации образовательной программы по направлению подготовки 17.03.01 "Корабельное вооружение" .....		430

# 20 лет кафедре синергетики и процессов управления Южного федерального университета

**Попов Андрей Николаевич**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[aprovov@sedu.ru](mailto:aprovov@sedu.ru)

**Аннотация.** Доклад посвящен 20-летию кафедры синергетики и процессов управления Южного федерального университета. Обсуждаются предпосылки создания кафедры как отдельного структурного подразделения университета, рассмотрены основные этапы становления и развития кафедры. Кратко представлены наиболее значимые результаты этого развития в ключевых аспектах деятельности кафедры за двадцатилетний период.

**Abstract.** The paper is dedicated to the 20th anniversary of the Department of Synergetics and Control Processes of the Southern Federal University. The prerequisites for the creation of the department as a separate structural unit of the university are discussed, the main stages of the formation and development of the department are considered. The most significant results of this development in main aspects of the department's activities over a twenty-year period are briefly presented.

**Ключевые слова:** кафедра синергетики и процессов управления, научная деятельность, образовательная деятельность.

**Keywords:** Department of Synergetics and Control Processes, synergetic control theory, scientific projects, educational activity.

## I. Создание кафедры

Возникновение чего-то нового всегда порождает ряд вопросов из разряда: почему это новое возникло и чем отличается от того, что было ранее. В этой связи, представляется вполне естественным сначала ответить на эти вопросы в контексте рассматриваемой темы. А в первую очередь рассмотреть основные предпосылки и причины создания кафедры синергетики и процессов управления (СиПУ) в составе Таганрогского радиотехнического университета (ТРТУ) в 2002 г.

Сейчас, спустя 20 лет у автора доклада, являющегося свидетелем и непосредственным участником тех событий, сформировалось достаточное ясное и, наверное, более объективное, чем тогда, понимание указанных предпосылок и причин. Чтобы это понимание возникло и у читателя, необходим небольшой исторический экскурс.

Образование кафедры совпало по времени с трудным этапом в истории нашей страны. Финансирование науки и образования сократилось до минимума. Наблюдался

существенный отток научно-технических кадров из отрасли и их иммиграция. Возникла серьезная угроза разрушения научных школ и утраты ведущих позиций во многих областях науки и техники.

В 1996 г. ТРТУ включается в консорциум зарубежных университетов для участия в крупном международном проекте Virtual Test Bed (VTB), направленном на создание программного обеспечения для моделирования процессов в крупных автономных энергосистемах. Профессор Анатолий Аркадьевич Колесников, будучи в это время заведующим кафедрой систем автоматического управления (САУ) возглавляет раздел «Новые стратегии управления», аспирант кафедры Веселов Г.Е. становится ответственным исполнителем проекта.

Сейчас мы иначе смотрим на финансирование из-за рубежа. Тогда же это был, возможно, единственный вариант не только «удержаться на плаву», но и двигаться дальше. Дальнейшее развитие событий это подтвердило.

Следует подчеркнуть, что на момент начала проекта VTB профессором А.А. Колесниковым уже были сформулированы базовые принципы и методы нового синергетического подхода в теории управления [1]. В издательстве «Энергоатомиздат» в 1994 г. вышла монография А.А. Колесникова «Синергетическая теория управления» [2]. В ноябре 1995 г. в Таганроге на базе ТРТУ состоялась конференция РАН и Министерства образования РФ «Синергетика и проблемы управления», собравшая крупных ученых в области теории и систем управления России.

Проект VTB представлялся прекрасным полигоном для применения методов новой теории для решения прикладных задач управления различными техническими объектами и системами (энергетическими, электромеханическими, и электротехническими и др.).

Условия выполнения проекта были достаточно жесткими: требовалось выполнение большого объема исследований в заданные сроки. Времени на «раскачку» не давалось. Понятно, что для выполнения раздела «Новые стратегии управления» были задействованы кадровые ресурсы кафедры САУ. Здесь следует заметить, что большинство штатных преподавателей кафедры не понимали, а, следовательно, не принимали новую теорию профессора А.А. Колесникова. В этой связи, к работе по проекту были в основном привлечены аспиранты кафед-

ры. Наверное, здесь можно вспомнить М. Планка, говорившего, что «... новая идея редко внедряется путем постепенного убеждения оппонентов» и что «... растущее поколение с самого начала осваивается с новой идеей».



Рис. 1. Основные исполнители проекта VTB. Встреча с американскими коллегами в ТРТИ, 1999 г.

Фактически аспиранты профессора А.А. Колесникова, которые являлись основными исполнителями международного проекта, составили костяк формирующейся научной школы «Синергетика и проблемы теории управления». В конце 1990-х и начале 2000-х были защищены первые кандидатские диссертации по синергетической теории управления. В 1997 г. научный коллектив выиграл грант по ФЦП «Государственная поддержка высшего образования и фундаментальной науки на 1997–2000 гг.» на издание трехтомной монографии «Современная прикладная теория управления». Эта монография, авторами которой стали ученые РАН, ТРТУ, СПбГЭТУ (ЛЭТИ), Военно-воздушной инженерной академии им. Н.Е. Жуковского и Донского государственного технического университета вышла в печать в 2000 г. [3–5].

Таким образом, к 2002 г. в составе кафедры САУ сформировался вполне автономный научный коллектив молодых исследователей под руководством маститого ученого. Этот коллектив, связанный общностью научных интересов и обладающий, благодаря выполнению международного проекта, дополнительными финансово-выми ресурсами и большими возможностями, не совсем вписывался в картину классической кафедры университета того времени.

Был ли возникший тогда определенный конфликт «отцов и детей» кафедры САУ основной причиной образования кафедры СиПУ? Думается, что нет. Молодые преподаватели принимали непосредственное участие во всех процессах на кафедре: создавали новые учебные курсы, делали собственными силами ремонт помещений, руководили научными исследованиями студентов и пр. Между молодыми сотрудниками и их старшими коллегами были нормальные профессиональные и человеческие отношения. Вполне возможно, кафедра САУ, пройдя определенный «переходной процесс», смогла бы выйти на качественно новый виток своего развития. Но здесь вмешались «внешние» факторы, предопределившие дальнейший ход событий.

Любая университетская кафедра – не вешь в себе, она входит в структуру подразделения более высокого уровня иерархии – факультета или института. Возникший в то время глубокий антагонизм между А.А. Колесниковым, который заведовал кафедрой САУ более 20 лет, и руководством факультета был очевиден. Не считаем себя вправе и не видим необходимости описывать здесь истоки и протекание этого конфликта. Тем более, автор являлся представителем одной из конфликтующих сторон, и его мнение будет субъективным. Желающим более глубоко погрузиться в эту тему, можно рекомендовать интервью А.А. Колесникова газете «Таганрогская правда» [6].

Фактом остается то, что к лету 2002 г., когда намечались очередные выборы зав. кафедрой САУ, указанный конфликт достиг апогея. Вероятность того, что А.А. Колесникова переизберут на Ученом совете факультета, была весьма призрачной. Возникли риски эффективного функционирования новой научной школы и сохранения имеющегося исследовательского потенциала в новых административных условиях. В этой связи А.А. Колесниковым было принято решение обратиться с просьбой к руководству университета об образовании новой кафедры в составе другого факультета ТРТУ. Необходимо обязательно подчеркнуть, что важную роль в последующем решении руководства университета сыграли письма в поддержку профессора А.А. Колесникова, направленные ректору из ведущих ВУЗов страны и РАН.

Приказами ректора ТРТУ В.Г. Захаревича № 211 и № 214 от 26.06.2002 г. были образованы кафедра «Синергетика и процессы управления» и научно-образовательный центр «Синергетические технологии управления и моделирования» (НОЦ СТУиМ). Профессор А.А. Колесников был назначен заведующим кафедрой СиПУ и директором НОЦ СТУиМ. Сотрудники и аспиранты кафедры САУ, являвшиеся представителями научного коллектива А.А. Колесникова, обратились с письмом к ректору с просьбой перевести их в состав вновь созданных подразделений университета. На кафедру и НОЦ также были переведены все НИР, выполняемые этим коллективом.

Приказы от 26.06.2002 г. положили официальное начало истории кафедры синергетики и процессов управления.

## II. СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ КАФЕДРЫ

В состав кафедры СиПУ и НОЦ СТУиМ на момент ее образования вошли следующие научно-педагогические работники:

1. Колесников Анатолий Аркадьевич – зав. кафедрой, д.т.н., проф. (67 лет).
2. Веселов Геннадий Евгеньевич – зам директора НОЦ, к.т.н., доцент (36 лет).
3. Попов Андрей Николаевич – доцент, к.т.н. (34 года).
4. Медведев Михаил Юрьевич – доцент, к.т.н. (28 лет).
5. Колесников Александр Анатольевич – ассистент, к.т.н. (27 лет).
6. Кузьменко Андрей Александрович – ассистент, к.т.н. (28 лет).

Штатный состав кафедры составлял: 4,125 ставки профессорско-преподавательского состава, 2 ставки учебно-вспомогательного состава и 2,5 ставки сотрудников НОЦ СТУиМ. На кафедре обучалось 8 аспирантов.

В приказе об образовании кафедры было указано, что приоритетным направлением ее учебной работы является подготовка магистров. В это время российская высшая школа с энтузиазмом и оптимизмом встраивалось в Болонскую систему, открывались «радужные» перспективы эквивалентирования дипломов, тесного, плодотворного и равноправного сотрудничества с ведущими западными университетами. Профессору А.А. Колесникову была поручено разработать план развития и совершенствования магистерской подготовки в ТРТУ.



Рис. 2. Состав кафедры СиПУ и НОЦ СТУиМ в 2002 г.

Первые 5 лет можно условно назвать этапом становления кафедры. В это время преподаватели кафедры читали авторские курсы лекции для студентов других подразделений («Современные проблемы автоматизации и управления», «Синергетика макросистем», «Компьютерное управление техническими объектами», «Синергетическая теория управления»). Были осуществлен набор первых магистрантов кафедры на программы 550213 «Системы автоматического управления летательными аппаратами» и 550202 «Теория систем управления». Было лицензировано направление подготовки бакалавров 553000 «Системный анализ и управление».

Но основным направлением деятельности коллектива являлись научные исследования, направленные на развитие концептуальных основ и методов синергетической теории управления [1]. За эти первые 5 лет было выполнено 12 НИР, из которых почти половина по хозяйственным договорам. Аспирантами и соискателями кафедры было защищено 6 кандидатских диссертаций, а в 2006 г. Веселовым Г.Е. была защищена первая докторская диссертация по синергетическому управлению. Сотрудники и аспиранты кафедры принимали очное участие в зарубежных конференциях. В 2006 г. в издательстве URSS вышла серия монографий «Синергетические методы управления сложными системами», в которых были представлены основные результаты фундаментальных и прикладных исследований коллектива [7–9]. Книги этой серии пользуются спросом и сейчас, а в 2019 г. эта серия была переиздана в третий раз.

Этап становления кафедры в 2002–2007 гг. вспоминается как некоторый «романтический» период, когда сотрудники не были особо обременены учебной, а тем более методической работой, а в основном занимались наукой. Наверное, это то, к чему и стремился, создавая кафедру нового типа, профессор А.А. Колесников. Но в сложившейся к тому времени российской образовательной системе, в которой количество штатных сотрудников кафедры напрямую зависит от количества студентов, такое положение дел стало уже невозможным. Стало очевидным, что без полноценного образовательного процесса с подготовкой на кафедре не единичных магистрантов, а полноценных студенческих групп, дальнейшее развитие не имеет перспектив.

В 2007 г. кафедрой осуществлен первый набор студентов по направлению бакалавриата 220100 «Системный анализ и управление». Кроме этого, на кафедре начинается подготовка целевых магистрантов – сотрудников Таганрогского авиационного научно-технического комплекса им. Г.М. Бериева (ТАНТК). В дальнейшем было проведено еще два таких набора, а на магистерских программах «Системы автоматического управления летательными аппаратами» и «Автоматизация и управление в административных, финансовых и коммерческих сферах» всего прошли обучение более 70-ти сотрудников этого предприятия.



Рис. 3. Первый выпуск целевых магистрантов – сотрудников ТАНТК им. Г.М. Бериева в 2010 г.

В дальнейшем образовательная деятельность кафедры стала принимать регулярный характер. Проводился ежегодный набор студентов по программам бакалавриата и магистратуры направления «Системный анализ и управление», велась подготовка специалистов по направлению 09.05.01 «Применение и эксплуатация автоматизированных систем специального назначения», а с 2020 г. кафедра реализует программу бакалавриата по направлению 17.03.01 «Корабельное вооружение». Общая статистика по образовательной деятельности кафедры за 20 лет будет представлена ниже.

Ведение полноценной образовательной деятельности мало сказалось на эффективности научных исследований. Выполняются НИР, публикуются монографии, защищаются диссертации, расширяется область исследо-

ваний. Общие сведения по научно-исследовательской деятельности кафедры за 20 лет будут представлены в следующих разделах.

К основным направлениям научных исследований, которые проводились на кафедре, можно отнести:

- развитие теории и методов синергетического синтеза нелинейных систем, основанных на концепции направленной самоорганизации и управляемой динамической декомпозиции синтезируемых систем;
- распространение метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов на классы нелинейных объектов, обладающих бифуркационными свойствами и хаотической динамикой и действующих в условиях неопределенности внешней среды;
- развитие прикладных методов синергетического синтеза нелинейных векторных регуляторов для электромеханических, мехатронных и робототехнических систем;
- разработка новых методов синергетического управления нелинейными электротехническими системами (силовые преобразователи постоянного и переменного тока, их группы и др.);
- развитие методов синергетического управления неустойчивыми нелинейными колебательными механическими системами;
- развитие методов синергетического управления пространственным движением летательных аппаратов разных классов (самолеты-амфибии, экранолеты, малые беспилотные аппараты и др.);
- разработка новых методов синергетического управления электроэнергетическими и теплоэнергетическими системами;
- разработка методов синтеза энергосберегающих регуляторов технических систем;
- разработка методов синергетического синтеза иерархических систем управления;
- развитие методов исследования биомеханических движений человека;
- развитие методов обработки информации на основе подходов нелинейной динамики и синергетической теории управления;
- развитие методов нелинейного адаптивного управления;
- развитие методов построения нелинейных гарантирующих регуляторов, обеспечивающих подавление наихудших возмущений, действующих на объект со стороны внешней среды;
- развитие методов синергетического управления социально-экономическими системами.

В настоящее время кафедра входит в структуру Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета; на ней работает 16 штатных сотрудников.



Рис. 4. Состав кафедры в 2022 г.

В следующих разделах доклада будут приведены основные результаты деятельности кафедры за время ее существования

### III. ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Кафедра осуществляла образовательный процесс по следующим направлениям подготовки:

- «Автоматизация и управление» (магистратура);
- «Системный анализ и управление» (бакалавриат, магистратура);
- «Применение и эксплуатация автоматизированных систем специального назначения», (специалитет);
- «Корабельное вооружение» (бакалавриат);
- «Управление в технических системах» (аспирантура).

Прошли обучение более 500 студентов и более 70 аспирантов. Суммарный выпуск: 77 бакалавров, 140 магистров, 30 специалистов. 16 аспирантов кафедры защитили кандидатские диссертации.

Выпускники кафедры успешно работают на различных промышленных предприятиях, в НИИ, конструкторских бюро и ВУЗах.

### IV. НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

На кафедре выполнены следующие НИОКР:

1. Виртуальная моделирующая установка для современных электрических систем (х/д Университет Южной Каролины, 2001-2002 гг., 60 000\$, руководитель – Колесников А.А.).
2. Развитие фундаментальных основ синергетической теории управления (Грант Министерства образования и науки, 2001-2002 гг., 283 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).
3. Разработка теории и методов синергетического синтеза иерархических систем управления и биомеханических систем, а также управление экономическими системами и процессами (Грант Министерства образования и науки, 2001-2003 гг., 120 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).

4. Развитие методов нелинейной динамики для определения количественных и качественных характеристик постуральной системы человека: синергетический подход и компьютерная стабилография (грант РФФИ, 2002-2004 гг., 282 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).

5. Программа исследований и разработок систем электрического корабля (х/д Университет Южной Каролины, 2003-2006 гг., руководитель – Колесников А.А.).

6. Синергетическое управление частотой и мощностью ЭЭС в экстремальных режимах (х/д ОАО «СО-ЦДУ ЕЭС», 2003-2005 гг., 1 600 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).

7. Развитие синергетических основ нелинейной теории системного синтеза (Грант Министерства образования и науки, 2003-2004 гг., 160 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).

8. Разработка теории и методов синергетического управления электроэнергетическими системами (Грант Министерства образования и науки, 2004-2008 гг., 400 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).

9. Разработка программно-моделирующего комплекса для исследования систем управления барабанным котлом (х/д ОАО «Севзапмонтажавтоматика», 2005 г., 236 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).

10. Разработка программно-моделирующего комплекса для исследования движения гидросамолета (х/д ОАО «Таганрогский авиационный научно-технический комплекс им. Г.М. Бериева», 2005-2006 гг., 200 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).

11. Разработка программно-моделирующего комплекса для исследования и модернизации систем управления исполнительных механизмов летательных аппаратов (х/д ФГУП «325 АРЗ» Минобороны России, 2005-2006 гг., 240 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).

12. Синергетические методы кардинального решения проблемы эффективного управления энергосистемами (Грант Министерства образования и науки, 2006-2008 гг., 2 076 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).

13. Синергетическая теория и методы системного синтеза (грант РФФИ, 2006-2008 гг., 1 100 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).

14. Нелинейная теория и методы синтеза систем адаптивного управления теплоэнергетическими процессами (Грант Министерства образования и науки, 2009-2013 гг., 3 727 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).

15. Нелинейные методы управления движением гидросамолётов в условиях значительного морского волнения: синергетический подход (Грант Министерства образования и науки, 2009-2010 гг., 1 710 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).

16. Новые методы синтеза систем адаптивного управления движением самолетов-амфибий в условиях экстремального воздействия внешней среды (грант РФФИ, 2010-2012 гг., 1 055 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).

17. Разработка методов группового управления робототехническими комплексами (грант РФФИ, 2010-2012 гг., 1 280 тыс. руб., руководитель – Веселов Г.Е.).

18. Разработка структуры и алгоритмического обеспечения подсистем наблюдения и интегральной адаптации интеллектуального адаптивного автопилота гидросамолета (Грант Министерства образования и науки, 2011 г., 917 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).

19. Самоорганизующиеся стратегии группового управления робототехническими системами (грант РФФИ, 2013-2015 гг., 1 665 тыс. руб., руководитель – Веселов Г.Е.).

20. Нелинейные методы адаптивного управления генераторами энергосистем (грант РФФИ, 2013-2015 гг., 1 600 тыс. руб., руководитель – Кузьменко А.А.).

21. Теоретические и алгоритмические основы энергосберегающего управления транспортными средствами на электрической тяге (грант РФФИ, 2013-2015 гг., 1 150 тыс. руб., руководитель – Попов А.Н.).

22. Метод интегральной адаптации в нелинейных задачах управления сложными техническими объектами (грант РФФИ, 2014-2016 гг., 1 600 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).

23. Новые нелинейные методы и технологии создания интеллектуальных систем навигации и управления подвижными объектами, функционирующими в экстремальных условиях (Гос. задание, 2014-2015 гг., 2 163 тыс. руб., руководитель – Колесников А.А.).

24. Синерго-кибернетический подход к синтезу роевых стратегий группового управления мобильными роботами (грант РФФИ, 2016-2018 гг., 1 665 тыс. руб., руководитель – Веселов Г.Е.).

25. Разработка теоретических основ построения иерархических систем управления силовыми установками электромобилей (грант РФФИ, 2018-2020 гг., 2 400 тыс. руб., руководитель – Попов А.Н.).

26. Метод построения распределенных информационно-управляющих систем для управления транспортными потоками на основе событийно связанных автоматных моделей в рамках концепции интернета вещей (грант РФФИ, 2018-2019 гг., 1 000 тыс. руб., руководитель – Елькин Д.М.).

27. Синерго-кибернетический подход к синтезу управления со скользящим режимом сложными нелинейными системами (грант РФФИ, 2019-2020 гг., 1 880 тыс. руб., руководитель – Кузьменко А.А.).

28. Разработка теоретических основ, биоинспирированных моделей, методов и алгоритмов управления роем гомогенных роботов в условиях ограниченного пространства (грант РФФИ, 2019-2021 гг., 3 000 тыс. руб., руководитель – Веселов Г.Е.).

Таким образом, за 20 лет выполнено:

- 6 хоздоговорных НИР;
- 13 НИР по грантам РФФИ;
- 9 НИР по грантам Министерства и государственному заданию.

Общий объем привлеченных средств с учетом актуального на момент выполнения курса доллара – 983 750\$.

Опубликовано 23 научных монографии, более 150 статей в журналах ВАК, более 100 статей в изданиях, индексируемых в Scopus и WoS. Монография «Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерирования электрической энергии» [10] признана победителем Всероссийского конкурса литературы по энергетике, проведенном РАО

«ЕЭС России» и Московским энергетическим институтом в 2007 году. Статья [11] стала лауреатом Всероссийского конкурса в области энергетики и смежных наук «Новая генерация», проводимого Российской академией наук РФ и РАО «ЕЭС России».

#### V. Подготовка кадров высшей квалификации

На кафедре за 20 лет было защищено 20 кандидатских и 2 докторских диссертации:

1. Мушенко А.С. Синергетический синтез нелинейных систем взаимосвязанного управления пространственным движением (к.т.н.), 2003 г., рук. Колесников А.А.

2. Топчиев Б.В. Синергетический синтез нелинейных систем взаимосвязанного управления мобильными роботами (к.т.н.), 2003 г., рук. Колесников А.А.

3. Погорелов М.Е. Синергетический синтез нелинейных систем взаимосвязанного управления теплоэнергетическими объектами (к.т.н.), 2003 г., рук. Колесников А.А.

4. Лаптев С.В. Синергетический метод синтеза нелинейных систем иерархического управления теплоэнергетическими процессами (к.т.н.), 2004 г., рук. Колесников А.А.

5. Веселов Г.Е. Прикладная теория и методы синергетического синтеза иерархических систем управления (д.т.н.), 2006 г., научный консультант Колесников А.А.

6. Чернавина В.Ю. Синергетическое управление нелинейными автоколебательными системами с регулярной и хаотической динамикой (к.т.н.), 2007 г., рук. Колесников А.А.

7. Могин А.В. Синергетический синтез систем противоаварийного управления процессами генерации электрической энергии (к.т.н.), 2007 г., рук. Колесников А.А.

8. Кобзев В.А. Синергетический метод аналитического конструирования систем взаимосвязанного управления движением гидросамолетов (к.т.н.), 2008 г., рук. Колесников А.А.

9. Нгуен Ф. Метод синергетического синтеза систем управления продольным движением самолетов-амфибий в условиях значительного морского волнения (к.т.н.), 2008 г., рук. Колесников А.А.

10. Никитин А.И. Синергетический синтез систем векторного управления посадкой самолета-амфибии (к.т.н.), 2009 г., рук. Колесников А.А.

11. Капустина А.С. Синергетический метод синтеза систем хаосдинамической обработки информации (к.т.н.), 2010 г., рук. Колесников А.А.

12. Чернышев А.Б. Теория и методы анализа устойчивости и синтеза регуляторов нелинейных распределенных систем (д.т.н.), 2011 г., научный консультант Колесников А.А.

13. Воронков О.Ю. Методы синергетического синтеза иерархических систем балансировки «летающих платформ» (к.т.н.), 2011 г., рук. Колесников А.А.

14. Крееренко О.Д. Метод совмещенного синтеза законов управления движением летательных аппаратов по взлетно-посадочной полосе в режиме посадки (к.т.н.), 2011 г., рук. Колесников А.А.

15. Мотиенко Т.А. Прикладной метод синергетического синтеза иерархических систем управления летательными аппаратами (к.т.н.), 2011 г., рук. Веселов Г.Е.

16. Бублей И.Е. Синтез и исследование адаптивных гидроакустических систем методами нелинейной динамики (к.т.н.), 2011 г., рук. Колесников А.А.

17. Радионов И.А. Синергетическое управление асинхронным тяговым электроприводом транспортных систем (к.т.н.), 2012 г., рук. Веселов Г.Е.

18. Скляров А.А. Методы синергетического синтеза нелинейных систем управления мобильными роботами (к.т.н.), 2014 г., рук. Веселов Г.Е.

19. Крееренко Е.С. Метод синергетического синтеза систем управления авиационно-космическими комплексами на базе сверхтяжелых самолетов-амфибий (к.т.н.), 2020 г., рук. Колесников А.А.

20. Ингабире А. Прикладные методы синергетического синтеза систем управления беспилотными летательными аппаратами с жестким крылом (к.т.н.), 2021 г., рук. Веселов Г.Е.

21. Синицын А.С. Синергетические методы синтеза систем управления активной подвеской (к.т.н.), 2022 г., рук. Веселов Г.Е.

22. Обухова Е.Н. Прикладной метод синергетического синтеза адаптивных систем управления электропневматическими приводами (к.т.н.), 2022 г., рук. Веселов Г.Е.

#### VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С 2021 г. кафедра носит имя ее основателя и научного руководителя, нашего Учителя – профессора Колесникова Анатолия Аркадьевича. В своем интервью газете «Таганрогская правда» в 2002 г. он, в свойственной ему прямой, а для кого-то резкой, манере, изложил свое представление о том, каким должен быть современный университет. «... Помимо, стандартных учебных, финансовых и социально-культурных показателей, главное, что отличает, на мой взгляд, настоящий и современный университет, заключено в следующей триаде: это научные школы мирового класса; это многолетние интеллектуальные традиции; это истинное уважение и поддержка крупных ученых и профессоров, создававших научные школы и университетские традиции. Все остальное, в том числе и «организационно-методическая работа», «контроль знаний студентов» и т.д., и т.п., вторично по отношению к указанной триаде. Нет научных школ и традиций, служащих стержнем для любого современного университета, – и все заменяется ежедневной мелкой суетой и интригами, а сам университет превращается в заурядное учреждение со своей местной «вертикалью власти», враждующими кланами и др. Вузы, в которых отсутствуют традиции, научные школы и уважение к основоположникам этих школ и традиций – это не университеты в истинном понимании слова, а в лучшем случае офисы, в которых собираются молодые люди для

бесполезного, в конечном итоге, проведения времени. Такого рода вузы – машины по производству дипломов о «колониальном высшем образовании» – представляют собой новую разновидность загрязнения образовательной среды. Они несут явную угрозу для российской науки и образования».

Сейчас эти слова, на наш взгляд, не потеряли своей актуальности. Кафедра синергетики и процессов управления имени профессора А.А. Колесникова, разумеется, сегодня другая, чем 20 лет назад. Но в своем развитии старается сохранить традиции, заложенные ее основателем, а по мере сил, и приумножить их.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Веселов Г.Е., Попов А.Н., Кузьменко А.А.* Синергетический подход в теории управления: истоки, развитие, результаты // X Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: Сб. науч. тр. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – С. 12-18.
2. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 334 с.
3. Современная прикладная теория управления: Ч. I. Оптимизационный подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М.; Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. – 400 с.
4. Современная прикладная теория управления: Ч. II. Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М.; Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. – 556 с.
5. Современная прикладная теория управления: Ч. III. Новые классы регуляторов технических систем / под ред. А.А. Колесникова. – М.; Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. – 656 с.
6. *Львовская Р.* Синергетика или компьютерная эйфория? // Таганрогская правда. – 2001. – 16 марта. – С. 4-5.
7. *Колесников А.А.* Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – Изд. стереотип. – М.: URSS, 2019. – 240 с.
8. *Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Колесников А.А., Топчев Б.В., Мушенко А.С., Кобзев В.А.* Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. – Изд. стереотип. – М.: URSS, 2019. – 300 с.
9. *Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Кузьменко А.А., Погорелов М.Е., Кондратьев И.В.* Синергетические методы управления сложными системами: энергетические системы. – Изд. стереотип. – М.: URSS, 2019. – 248 с.
10. *Колесников А.А., Кузьменко А.А., Веселов Г.Е.* Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерирования электроэнергии. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 280 с.
11. *Кузьменко А.А.* Нелинейное адаптивное управление турбогенератором // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2008. – № 1. – С. 112-119.

## Секция I

# ПРОБЛЕМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

DOI: 10.18522/syssyn-2022-2

## Исследование биологической очистки на предприятии «ИДАВАНГ Агро» по компьютерным моделям

Андреев Александр Васильевич  
Санкт-Петербургский  
государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ»  
Санкт-Петербург, Россия  
*a-sanya01@mail.ru*

Грудяева Елизавета Сергеевна  
Санкт-Петербургский  
государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ»  
Санкт-Петербург, Россия  
*1000gek@gmail.com*

Душин Сергей Евгеньевич  
Санкт-Петербургский  
государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ»  
Санкт-Петербург, Россия  
*dushins@yandex.ru*

**Аннотация.** Целью исследования является установление эффективности биологической очистки сточных вод на предприятии животноводческого комплекса «ИДАВАНГ Агро» с применением компьютерных моделей как процессов нитрификации и денитрификации, так и ASM1, для многозонных реакторов, в том числе с мембранным блоком. Выяснено, что биологическая очистка осуществима на рассматриваемом предприятии с применением трехзонного мембранных реактора.

**Abstract.** The goal of the research is to establish the effectiveness of biological wastewater treatment at the enterprise of livestock complex «IDAVANG Agro» using computer models of both nitrification and denitrification processes, as well as ASM1 and multi-zone reactors with inclusion of membrane unit. As a result of a research it was found that biological wastewater treatment is possible at the enterprise with the usage of three-zone reactor with a membrane unit, however, the issues of system regulation as well as the influence of temperature and pressure on processes remained open.

**Ключевые слова:** биологическая очистка, активный ил, нитрификация, денитрификация, модель ASM1, многозонный биореактор.

**Keywords:** biological wastewater treatment, activated sludge, nitrification, denitrification, ASM1 model, multi-zone bioreactor.

### I. ВВЕДЕНИЕ

В животноводческом комплексе «ИДАВАНГ Агро», занимающимся выращиванием свиней, есть потребность очистки стоков. Несмотря на эффективность (параметры после очистки соответствуют предельно-допустимым

концентрациям, или ПДК) уже функционирующей системы очистки, она имеет недостаток: сразу же после предварительной фильтрации (очистки стоков от механических примесей) в атмосферу здания предприятия выделяется аммиак. Данное явление в течение длительного времени негативно сказывается на самой технике, потому персоналу периодически приходится заниматься поиском решения проблемы и своевременно ее устранять. Разумеется из-за остановки процесса на данном этапе в течение продолжительного времени процессы могут встать и на «механическом» этапе. Подробнее *сама* система очистки описана в [1].

Поэтому возникает задача изучения биологической очистки стоков как альтернативного решения лишенного подобного недостатка.

### II. МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРЕДПРИЯТИЯ

В качестве базовой модели биологической очистки принимается модель активного ила (Activated Sludge Model 1 или ASM1), которая описана в [2]. Ввиду сложности ее математической модели, имеет смысл для начала рассмотреть процессы нитрификации и денитрификации по-отдельности, составляющие основу ASM1.

Для исследования моделей с предприятия были получены следующие данные:

$S_o^{bx} = 6 \text{ г/м}^3$  – входная концентрация растворенного кислорода,

$S_{nh}^{bx} = 30 \text{ г/м}^3$  – входная концентрация аммонийного азота,

$S_{no}^{bx} = 18,6 \text{ г/м}^3$  – входная концентрация нитратного азота,

$S_s^{bx} = 6,5 \text{ ЭКВ/м}^3$  – входное значение щелочности,

$S_s^{bx} = 100 \text{ г/м}^3$  – входное значение растворенного биологически разложимого органического вещества (РБРОВ),

$V = 2700 \text{ м}^3$  – объем реактора.

Информация о ПДК аммонийного и нитратного вида азотов при сбросе сточных вод в водные объекты культурно-бытового водопользования была взята из [3]:

$$S_{nh}^{\text{ПДК}} = 2 \text{ г/м}^3, S_{no}^{\text{ПДК}} = 10.$$

Значения констант насыщения, гидролиза, распада, параметры фракций, коэффициенты прироста, максимальные удельные скорости роста, корректирующие факторы скорости роста веществ и бактерий были заимствованы из [4].

### III. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ НИТРИФИКАЦИИ

Согласно [4], у модели нитрификации существует три состояния равновесия.

Первое состояние равновесия соответствует вымыванию организмов изла из реактора, т.е. параметры загрязнений на выходе реактора равны входным. Поэтому для достижения очистки необходимо обеспечивать неустойчивость этого состояния, что достигается выполнением трех условий:

$$S_o^{bx} > S_{o\ min}^{bx}, \# \quad (1)$$

$$S_{nh}^{bx} > S_{nh\ min}^{bx}, \# \quad (2)$$

$$Q^{bx} < Q_{max}^{bx}, \# \quad (3)$$

При имеющихся входных параметрах объекта и принятых константах, из [4] следует, что максимально допустимое значение объемного входного расхода стоков

$$Q_{max}^{bx} = 1879 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Следует отметить, что значения  $S_{o\ min}^{bx}, S_{nh\ min}^{bx}$  зависят от расхода входного субстрата  $Q^{bx}$ , однако условия (1) и (2) нарушаются только при невыполнении условия (3). Таким образом, при входных параметрах объекта и объемном входном расходе стоков в промежутке  $Q^{bx} \in (0; 1879) \text{ м}^3/\text{сут}$  обеспечивается неустойчивость первого состояния равновесия и, тем самым, возможность очистки.

Второе состояние равновесия соответствует очистке, а устойчивость самого состояния определяется условием (2), которое, как уже выяснено, выполняется при обеспечении допустимого расхода входных стоков в реактор.

Третье состояние равновесия физически недостижимо, поскольку для его выполнения должно выполняться условие: либо  $S_o^{bx} > 0$  и  $S_{nh}^{bx} < 0$ , либо  $S_o^{bx} < 0$  и  $S_{nh}^{bx} > 0$ .

Рассмотренные утверждения подтвердились моделированием процессов с использованием программного средства MATLAB/Simulink. На рис. 1 представлены графики процессов очистки с учетом условия (2).

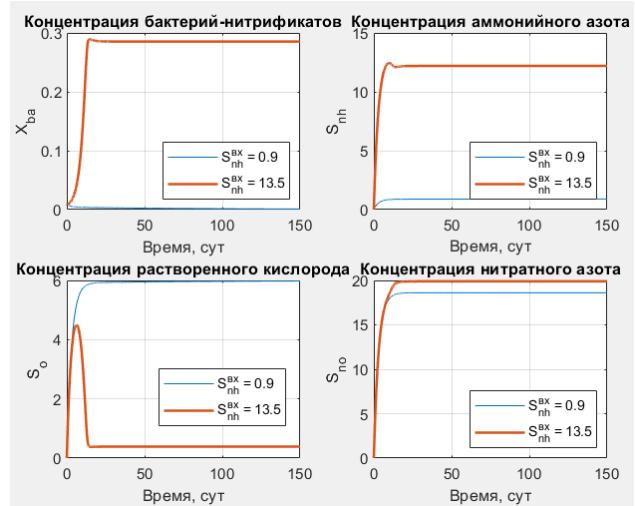


Рис. 1. Влияние аммонийного азота на протекание очистки

Можно наблюдать, что при малой концентрации аммонийного азота на входе нитрифицирующие бактерии активного ила вымываются из реактора, а концентрации загрязняющих веществ на выходе достигают входных. В случае присутствия достаточного количества аммонийного азота на входе в процессе очистки происходит уменьшение концентрации растворенного кислорода при росте бактерий-нитрификаторов, причем при их отмирании также повышается нитратный азот на выходе. Таким образом, бактерии-нитрификаторы производят нитратный азот и питаются растворенным кислородом (потому и необходимо выполнение условия (1)).

### IV. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ДЕНИТРИФИКАЦИИ

Согласно [4], у модели денитрификации существует три состояния равновесия.

Первое состояние равновесия, аналогично модели нитрификации, соответствует вымыванию организма изла из реактора, потому необходимо обеспечивать его устойчивость, что достигается выполнением четырех условий:

$$S_s^{bx} > S_{s\ min}^{bx}, \# \quad (4)$$

$$S_{no}^{bx} > S_{no\ min}^{bx}, \# \quad (5)$$

$$Q^{bx} < Q_{max}^{bx}, \# \quad (6)$$

$$S_o^{bx} < S_{o\ max}^{bx}, \# \quad (7)$$

При имеющихся входных параметрах объекта невозможно получить корректную информацию о максимально допустимом входном значении объемного расхода стоков – оно получается отрицательным, что означает невозможность выполнения условия (6) и в физической системе соответствует отсутствию подачи стоков. Разумеется, такого не может быть, причем если взять любое положительное значение входного расхода стоков, то максимально допустимое входное значение растворенного кислорода всегда будет меньше такого у объекта.

Таким образом условие (7) не будет выполняться, что соответствует невозможности очистки по модели денитрификации для рассматриваемого объекта.

Если же взять значение растворенного кислорода на порядок меньше:  $S_o^{bx} = 0,6 \text{ г/м}^3$ , и оставить остальные входные параметры неизменными, то максимально допустимое значение объемного расхода стоков следующее:

$$Q_{max}^{bx} = 2067 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Как и в модели нитрификации, значения  $S_o^{bx max}$ ,  $S_{no min}^{bx}$  и  $S_s^{bx min}$  зависят от расхода входного субстрата  $Q^{bx}$ , однако условия (4), (5) и (7) нарушаются только при невыполнении условия (6). Таким образом, при рассматриваемых входных параметрах и объемном входном расходе стоков в промежутке  $Q^{bx} \in (0; 2067) \text{ м}^3/\text{сут}$  обеспечивается неустойчивость первого состояния равновесия и, тем самым, возможность очистки.

Второе состояние равновесия соответствует очистке, а устойчивость самого состояния определяется условием (5), которое, как уже выяснено, выполняется при обеспечении допустимого входного расхода в реактор.

Третье состояние равновесия, как и в случае нитрификации, физически недостижимо, поскольку для него должно выполняться условие: либо  $S_s^{bx} > 0$  и  $S_{no}^{bx} < 0$ , либо  $S_s^{bx} < 0$  и  $S_{no}^{bx} > 0$ .

Рассмотренные утверждения подтвердились в результате проведения моделирования. На рис. 2 представлены графики процессов очистки с учетом условия (5).

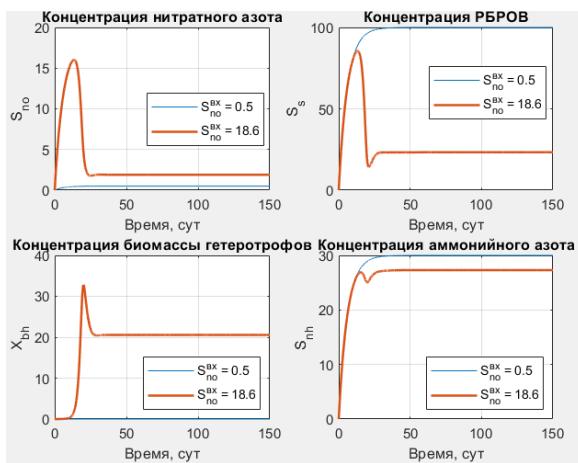


Рис. 2. Влияние нитратного азота на протекание очистки

Можно наблюдать, что при малой концентрации нитратного азота на входе денитрифицирующие бактерии активного ила вымываются из реактора, а концентрации загрязняющих веществ на выходе достигают входных. В случае присутствия достаточного нитратного азота на входе в процессе очистки происходит уменьшение концентрации как самого нитратного азота, так и аммонийного. Также происходит уменьшение Растворенного Биологически Разлагаемого Органического Вещества (РБРОВ) при росте биомассы гетеротрофов, причем при их отмирании также повышается аммонийный азот и РБРОВ на выходе. Следовательно, биомасса гетеротрофов питается РБРОВ, аммонийным и нитратным азотом, в то же время производя РБРОВ и аммонийный азот.

## V. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ASM1

Как было выяснено при исследовании моделей нитрификации и денитрификации обеспечение очистки происходит путем изменения входного объемного расхода стоков. Таким образом данная величина принимается управляемой. Для модели ASM1 отсутствует аналитическая зависимость состояний равновесия от изменения расхода стоков. Однако на основе программного языка Python и его библиотек был произведен вычислительный эксперимент, позволивший численно построить зависимости и соответствующие графики изменения расхода стоков на концентрации веществ на выходе реактора. Результаты данного эксперимента приведены на рис. 3.

На графиках можно наблюдать, что нитратный азот после очистки при малой подаче стоков не превышает ПДК, а аммонийный азот ниже входного значения, но все равно выше ПДК. Также видно, что в отличие от модели денитрификации, где невозможно было обеспечить протекание процессов очистки, у рассматриваемого

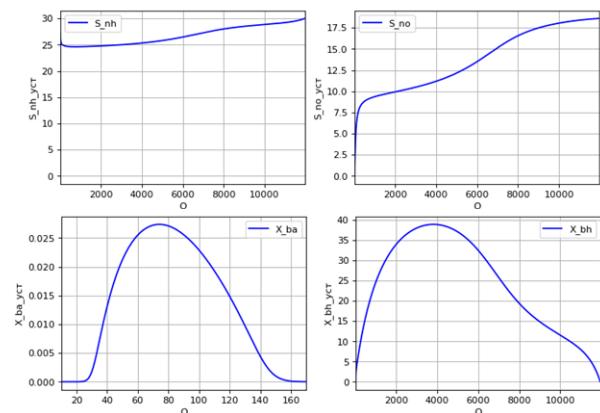


Рис. 3. Влияние входного расхода стоков в реактор на изменение концентраций веществ после очистки

объекта ввиду большого объема кислорода, у модели ASM1 процессы денитрификации протекают, однако бактерии-нитрификаторы (участвуют в процессах нитрификации) растут в очень малом диапазоне расхода стоков и достигают максимального значения при  $Q^{bx} = 74 \text{ м}^3/\text{сут.}$ . На рис. 4 представлены результаты моделирования переходных процессов для ASM1.

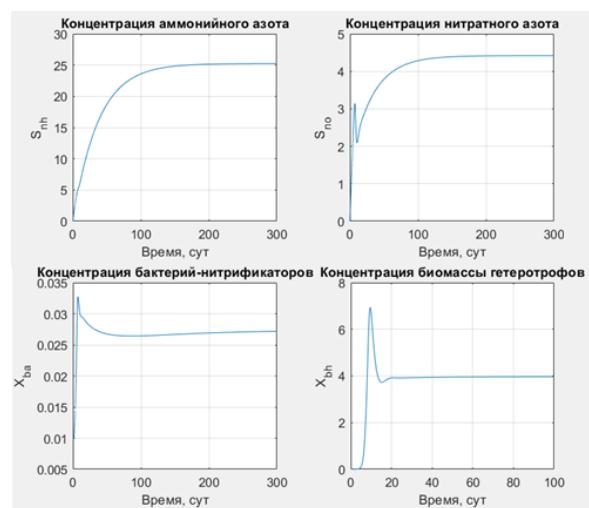


Рис. 4. Результат моделирования процессов по модели ASM1

На данном рисунке можно наблюдать, что бактерии-нитрификаторы и биомасса гетеротрофов действительно растет, а нитратный азот всегда ниже ПДК. В то же время аммонийный азот после очистки ниже входного значения, но превышает ПДК. Как было исследовано ранее, аммонийный азот уменьшается в результате процесса денитрификации, причем росту нитрифицирующих бактерий благоприятствует наличие кислорода, а росту денитрифицирующих бактерий, наоборот, отсутствие (или присутствие малой концентрации) кислорода. Модель ASM1 учитывает как сами процессы нитрификации и денитрификации, так и их взаимодействие, принимая реактор однозонным. На практике имеет место разделение реакторов на несколько зон для уменьшения влияние кислорода на процессы денитрификации и увеличения – на процессы нитрификации.

#### VI. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ДВУЗОННОГО РЕАКТОРА

Двузонный реактор включает зоны денитрификации и нитрификации. Его схема приведена на рис. 5.

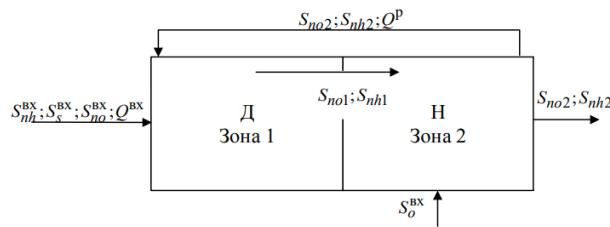


Рис. 5. Схема двузонного реактора

Количество управляемых воздействий в двухзонном реакторе повышается до трех: добавляется рециркуляционный поток (или же просто рецикл). Также предусматривается возможность изменять расход кислорода, поступающего в зону нитрификации. В целях упрощения управления поступлением кислорода на не рассматривается. Для исследования влияния рецикла на процесс биоочистки был проведен вычислительный эксперимент, аналогичный исследованию влияния входного потока, результаты которого представлены на рис. 6.

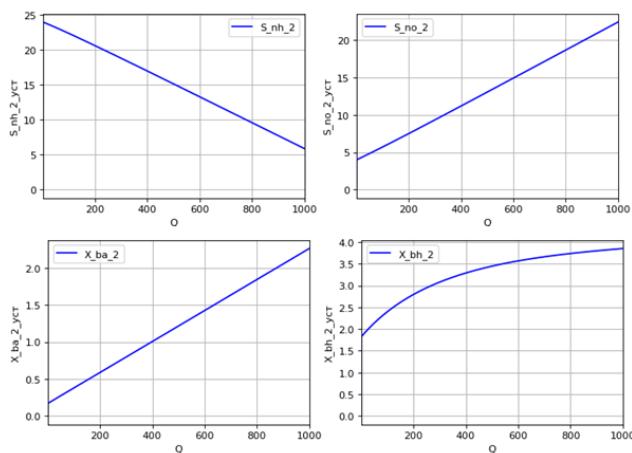


Рис. 6. Влияние рециркуляционного расхода между зонами на изменение концентраций веществ после очистки

Как можно видеть, повышение расхода в рецикле действительно приводит к уменьшению концентрации аммонийного азота на выходе, вместе с тем происходит

повышение нитратного азота. Таким образом, рецикл нужно подбирать исходя из ограничений по нитратному азоту согласно ПДК и минимального количества аммонийного азота, что происходит при значении рецикла  $Q^P = 300 \text{ м}^3/\text{сут}$ . На рис. 7 представлен результаты моделирования процессов.

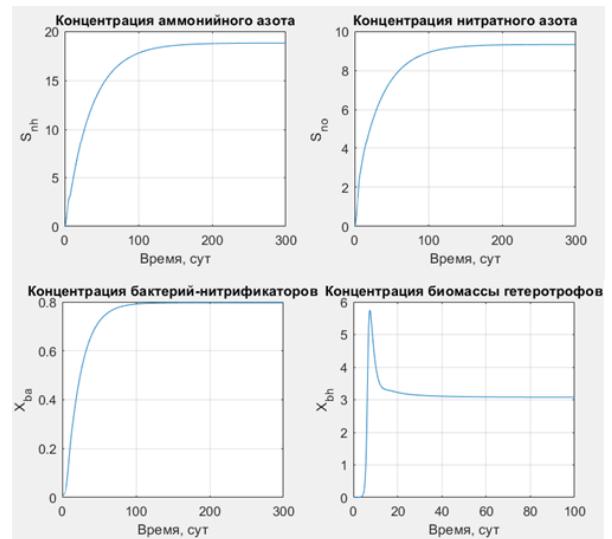


Рис. 7. Результат моделирования процессов по модели двузонного реактора

Можно наблюдать, что разделение реактора на две зоны действительно позволило улучшить качество очистки аммонийного азота, хотя он остался выше ПДК. Вместе с тем концентрация нитратного азота повысилась без превышения ПДК.

#### VII. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ТРЕХЗОННОГО РЕАКТОРА

Недостатком модели двузонного реактора является попадание кислорода в зону денитрификации через рециркуляционный поток. Однако данный недостаток исправляется путем включения еще одной зоны денитрификации сразу после зоны нитрификации. Это приводит к уменьшению концентрации растворенного кислорода перед подачей стоков в первую зону через рециркуляционный поток. Схема такого трехзонного реактора представлена на рис. 8.

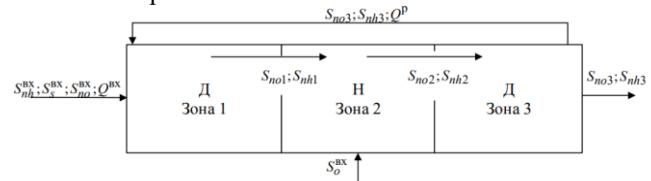


Рис. 8. Схема трехзонного реактора

Как можно наблюдать ниже на рис. 9, дополнительная зона позволяет уменьшить влияние кислорода на входную зону реактора.

Однако введение дополнительной зоны не приводит к улучшению процессов очистки – установленные концентрации остаются теми же, что и в случае двузонного реактора.

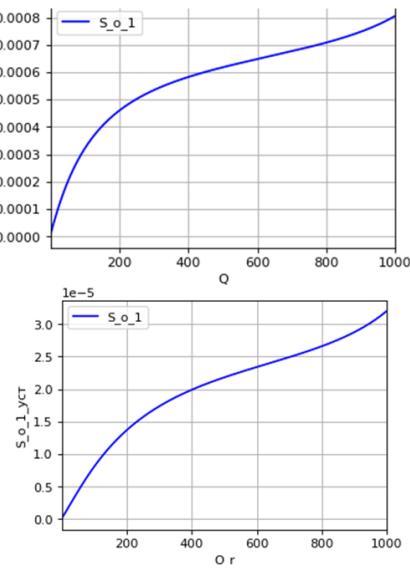


Рис. 9. Влияние кислорода на первую зону реактора при повышении рециркуляционного потока (сверху – двухзонный реактор, снизу – трехзонный реактор)

### VIII. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ТРЕХЗОННОГО РЕАКТОРА С МЕМБРАННЫМ БЛОКОМ

Все ранее рассмотренные модели имели недостаток: ил вымывался из реактора вместе со стоками. Таким образом после очистки в воде содержался не только превышающий ПДК аммонийный азот, но и частицы активного ила, которые можно в дальнейшем использовать при очистке. Для окончательной фильтрации стоков от ила применяют мембранный блок. На рис. 10 представлена схема системы, состоящая из реактора и мембранны.

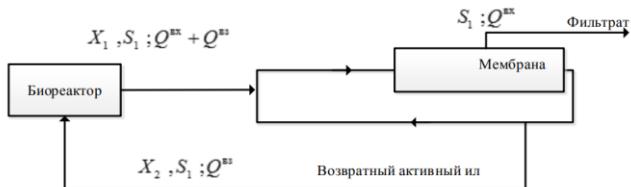


Рис. 10. Схема трехзонного реактора с мембранным блоком

Использование мембранного блока и поступление из него в реактор активного ила включает в систему еще одну управляемую величину – возвратный поток из мембранны. На рис. 11 отображено влияния возвратного потока на концентрации организмы ила.

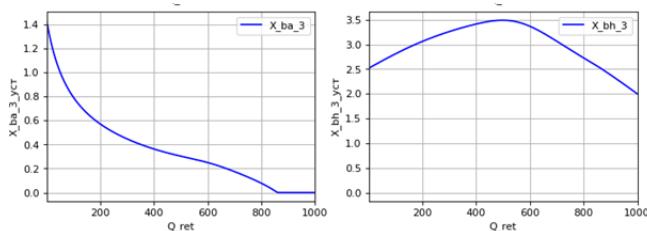


Рис. 11. Влияние возвратного потока на изменение концентрации организмы ила

Видно, что повышение возвратного потока приводит к уменьшению нитрифицирующих и денитрифицирующих организмов. Вместе с тем при возвратном потоке

$Q^{\text{воз}} = 546 \text{ м}^3/\text{сут}$  концентрация денитрифицирующих бактерий максимальна, что должно улучшить качество очистки аммонийного азота. На рис. 12 представлены результаты моделирования процессов в системе с мембранным блоком.

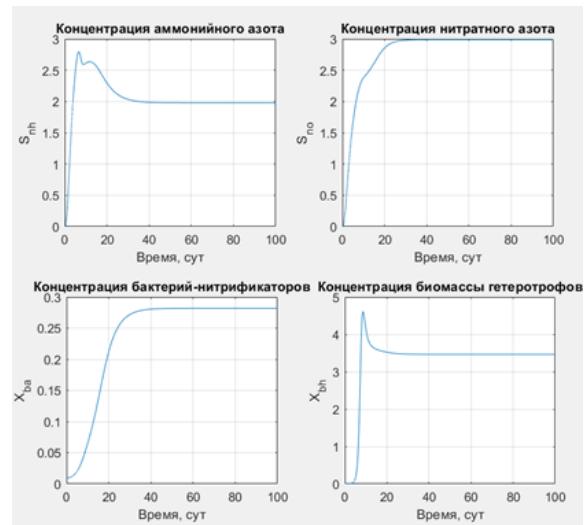


Рис. 12. Результат моделирования процессов по модели трехзонного реактора с мембранным блоком

Можно наблюдать, что добавление возвратного потока позволяет одновременно достичь концентраций аммонийного и нитратного азота ниже ПДК для установленных процессов. Однако аммонийный азот успевает превысить ПДК во время установления процессов, что недопустимо. Поэтому имеет смысл уменьшить входной расход подачи стоков, чтобы процесс успевал установиться до того, как аммонийный азот превысит ПДК. На рис. 13 представлен результат моделирования с пониженной подачей стоков.

Как видно, концентрации аммонийного и нитратного азота на протяжении всего времени не превышают ПДК, т.е. биологическая очистка на рассматриваемом предприятии возможна с применением трехзонного реактора с мембранным блоком.

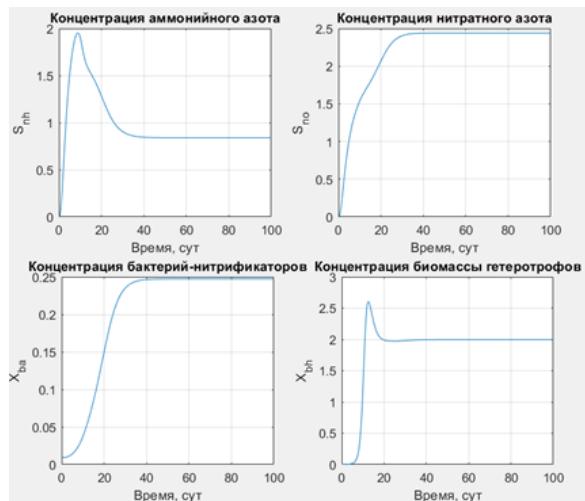


Рис. 13. Результат моделирования процессов по модели трехзонного реактора с мембранным блоком с пониженной подачей стоков

## IX. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа моделей биологической очистки для данных с предприятия «ИДАВАНГ Агро» можно отметить, что очистка на предприятии возможна с применением трехзонного реактора с мембранным блоком.

Вместе с тем, присутствует необходимость регулирования, поскольку может существовать иной набор регулируемых величин, позволяющий эффективнее производить очистку. Кроме того, входные значения стоков на предприятии могут изменяться, в результате чего изменяться и удовлетворяющие очистки значения управляемых величин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А.В. Система очистки сточных вод на предприятии ИДАВАНГ Агро // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова [Электрон. журн.]. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. – С. 8-11. – Режим доступа к журн. – [https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2021/sbornik\\_2021.pdf](https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2021/sbornik_2021.pdf) (дата обращения 23.06.2022).
2. Henze M., Grady C. P. L., Gujer W., Marais G. v. R., Matsuo T. Activated Sludge Model No. 1. London: IAWPRC, 1987.
3. ГОСТ 16887-71. Разделение жидкых неоднородных систем методами фильтрования и центрифугирования. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
4. Грудяева Е.К., Душин С.Е. Моделирование управляемых процессов биологической очистки сточных вод. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. – 231 с.

# Проект ГРАФО – первый шаг на пути к САО АН СССР

Клочкова Валентина Георгиевна

Лаборатория астроспектроскопии

Специальная астрофизическая обсерватория РАН,  
п. Нижний Архыз, Россия

*valentina.r11@yandex.ru*

Панчук Владимир Евгеньевич

Лаборатория астроспектроскопии

Специальная астрофизическая обсерватория РАН,  
п. Нижний Архыз, Россия

*panchuk@ya.ru*

**Аннотация.** Развитие наземной астрономии СССР, увенчавшееся проектами БТА и РАТАН, происходило в системе научно-организационных отношений, формировавшейся ещё в период дооценного становления и развития отечественных научно-технических проектов. В 20-е годы прошлого века была сформулирована и развивалась концепция ГРАФО (Горной Российской астрофизической обсерватории). Попытки реализации этого проекта в 30-е годы завершились организацией отечественного астрономического приборостроения, а также развитием и организацией отдельных научных учреждений.

**Abstract.** The development of ground-based astronomy of the USSR, culminating in the BTA and RATAN projects, took place in the system of scientific and organizational relations formed during the pre-war formation and development of domestic scientific and technical projects. In the 20s of the last century, the concept of the GRAPHO (Mountain Russian Astrophysical Observatory) was formulated and developed. Attempts to implement this project in the 30s ended with the organization of domestic astronomical instrumentation, as well as the development and organization of individual scientific institutions.

**Ключевые слова:** организация науки, обсерватории, институты, астрономическое приборостроение.

**Keywords:** organization of science, observatories, institutes, astronomical instrumentation.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Принято считать, что выбор места для обсерватории определяется преимущественно из астроклиматических соображений. Однако детальный анализ происхождения отечественных оптических обсерваторий этого не подтверждает [1]. В различных случаях преобладали политические, экономические, директивные, и даже бытовые соображения. В первой половине XX века не удалось предвидеть и главный парадокс – организация обсерватории в экономически депрессивном (т.е., неперспективном для промышленного развития) районе, порождает проблему инженерных кадров, которые обсерватория вынуждена в таком районе не подбирать, а готовить самостоятельно. Молодых астрономов еще как-то удавалось привлечь идеей отрешенного занятия наукой в благоустроенном научном поселении, где развитие определяется наличием критической массы ученых, достаточной для проведения коллективных проектов. А молодых инженеров для обеспечения эксплуатации телескопов, инфраструктуры и поддержки сложнейших аст-

рофизических экспериментов всегда недоставало. Что касается астроклимата как научного направления, то первые теоретические и практические результаты появились уже после того, как проект ГРАФО был свёрнут. Поэтому ниже остановимся на событиях преимущественно организационного характера.

## II. ПРЕДЫСТОРИЯ. ОБСЕРВАТОРИИ РОССИЙСКОЙ ИМПЕРИИ

В рамках данного сообщения разделим все астрономические обсерватории XIX века на три типа: придворные, приморские и горные. Придворные обсерватории являлись демонстрацией высочайшего покровительства наукам. Например, Николаевскую Главную астрономическую обсерваторию вначале предполагалось соорудить непосредственно в Царском Селе, а не на Пулковских высотах. Оснащение этой обсерватории также носило политический характер: в 1839 г. здесь был установлен самый крупный на то время рефрактор (диаметр объектива D=38 см). Одновременно такой же крупнейший в мире телескоп получила Гарвардская обсерватория, продуктивность этого инструмента оказалась намного выше. Так как в первые десятилетия в Пулковской обсерватории работали преимущественно приглашенные западные специалисты, сделаем предположение, что различие в продуктивности одинаковых телескопов определялось астроклиматическими условиями. Приморские обсерватории (г.Николаев, г.Гельсингфорс, г.Одесса) были оснащены, в первую очередь, астрометрическими инструментами, для обеспечения картографических работ и службы точного времени.

Строительство крупнейших телескопов также рассматривалось как демонстрация высоких технологий: рефрактор Йеркса (с объективом А.Кларка, D=102 см, фокусное расстояние F=18 м) являлся экспонатом Всемирной выставки в Чикаго (1893г.), а большой горизонтальный рефрактор (с объективом П.Готье, D=125 см, F=60 м), экспонат выставки в Париже (1900г.), использовался затем для научных наблюдений в течение года. В табл. 1 приведены сведения об обсерваториях Российской империи.

Следует отметить, что расходы на строительство и содержание обсерваторий существенно различались, и далеко не в пользу обсерваторий университетских. Например, на сооружение и оснащение обсерватории Новороссийского университета (г.Одесса) по смете 1868 г. предназначалось 27787 рублей, а на содержание обсерватории полагалось 2000 руб. в год [2]. Стоимость

6-дюймового рефрактора на экваториальной монтировке в те годы составляла 3000 руб. На содержание всех университетских обсерваторий в 80-х отпускалось 5500 рублей в год, в это же время на одну Пулковскую обсерваторию ежегодно полагалась сумма в 62000 рублей. Первый русский директор Пулковской обсерватории Ф.А.Бредихин «продержался» на должности с 1890 г. по 1895 г., уступив место О.А. Баклунду.

К концу XIX века число астрономических обсерваторий в мире составляло несколько сотен. Обсерваторий Российской империи было приблизительно в 10 раз меньше, чем в Западной Европе, и приблизительно в 3 раза меньше, чем в Северной Америке. Для государства протяженностью 11 часов по долготе и 40 градусов по широте, этого было не так много.

ТАБЛИЦА 1. ОБСЕРВАТОРИИ РОССИЙСКОЙ ИМПЕРИИ. ОБОЗНАЧЕНИЯ:

Год – ГОД ОСНОВАНИЯ, D – ДИАМЕТР ОБЪЕКТИВА НАИБОЛЬШЕГО РЕФРАКТОРА В СМ, Ф – ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ШИРОТА В ГРАДУСАХ, H – ВЫСОТА НАД УРОВНЕМ МОРЯ, В М.

Обсерватория, принадлежность	Год	D	φ	h
Харьковский университет	1808	16	51	120
Дерптский университет	1810	23	58	65
Виленский университет	1820	15	52	115
Николаевская морского ведомства	1821	16	47	52
Московский университет	1831	38	56	181
Пулковская обсерватория	1839	76	60	75
Киевский университет	1845	24	50	174
Одесский университет	1871	16	46	64
Ташкентская военного ведомства	1874	32	41	440
Санкт-Петербургский университет	1881	22	60	20
Рижский университет	1900	11	57	10
Казанский университет	1901	24	56	75
Симеизское отделение Пулковской обсерватории	1912 <sup>a</sup>	12	44	360

<sup>a</sup> год официального присоединения к Пулковской обсерватории

Еще в период создания Гарвардской спектральной классификации была показана высокая продуктивность экспедиционных работ в горах (в 1890 г. основана обсерватория в Ареипе, Перу,  $h=2430$  м). В конце XIX века в Калифорнии уже функционировала Ликская обсерватория (1888 г.,  $h=1283$  м), а в 1904 г. открылась обсерватория Маунт-Вилсон ( $h=1740$  м). Высота установки телескопа Йеркса ( $h=334$  м) также превышала высоты большинства обсерваторий Российской империи. Продуктивность инструментов горных обсерваторий в разы превышала продуктивность придворных и приморских обсерваторий (как за счет диаметра телескопов, так и, в основном, за счет погодного фактора). Именно географическая широта обсерватории (белые ночи), высота над уровнем моря и низкая повторяемость ясных ночей ограничивали отечественных астрономов при наблюдениях планет и астероидов, исследований центральных областей Млечного пути, систематическом мониторинге переменных звезд. Для астрономов, работающих преимущественно в университетах, наступил момент истины: чтобы оставаться заметными на международном научном уровне, необходимо было найти место и организовать новую обсерваторию, желательно в горах. Деятельность такой обсерватории должна соответствовать запросам астрофизики – науки, формирую-

щейся на достижениях астрономической спектроскопии и первых результатах новой физики (строение вещества и перенос излучения).

### III. ГРАФО – ИДЕЯ СОЗДАНИЯ И ПЕРВЫЕ ШАГИ

На первом съезде Всероссийского Астрономического Союза (Петроград, апрель 1917 г., 64 делегата), в числе других вопросов прозвучала идея продвижения астрономических наблюдений на юг России. Симеизское отделение Пулковской обсерватории уже функционировало в течение 5 лет. Идеологом и организатором Горной Российской астрофизической обсерватории (ГРАФО) явился Всеволод Викторович Стратонов (рис. 1), астроном, получивший образование в Новороссийском университете (Одесса), а также в период двухлетней подготовки в Пулковской обсерватории. Время пребывания Стратонова в Пулкове пришлось на период борьбы между «русской» и «немецкой» партиями в обсерватории (первые 50 лет штат Пулкова был заполнен исключительно специалистами, приглашенными из-за рубежа). По предложению Ф.А. Бредихина, с 1894 г. В.В. Стратонов выполнял астрофизические наблюдения на пулковском нормальном астрографе, установленном в Ташкенте, на обсерватории военного ведомства. В период пребывания на Кавказе (являясь с 1904 г. чиновником высокого ранга в Тифлисе [3, 4]), В.В. Стратонов, по-видимому, расширил свои представления об условиях наблюдений в горной местности. С 1918 г. профессор В.В. Стратонов – декан физико-математического факультета МГУ, в 1918-1920 – научный консультант Народного Комиссариата Просвещения (НКП), курирует издание научной литературы. В начале 1920 г. В.В. Стратонов выступил с предложением построить на юге России большую астрофизическую обсерваторию, оснащенную зарубежным оборудованием [5].



Рис. 1. Всеволод Викторович Стратонов (1869-1938)

В мае 1920 – Главный учёный совет (ГУС) НКП образовал временный комитет по устройству Главной Российской Астрофизической Обсерватории (ГРАФО), во главе с В.В. Стратоновым, в составе С.Н. Блажко, В.А. Костицына, А.А. Михайлова и А.К. Тимирязева. (Обращаем внимание, что, без изменения аббревиатуры, слово "Горная" уже было заменено на "Главная"). Учтено мнение И.А. Балановского, А.А. Белопольского, А.А. Иванова, С.К. Костинского, В.А. Михельсона, Г.А. Тихова, Э.К. Эпика. Позже проект был одобрен II Всероссийским астрономическим съездом (август

1920 г.). 25 марта 1921 г. ГУС НКП принял решение об учреждении Главной Астрофизической Обсерватории, сформирован оргкомитет, отпущены средства на организацию обсерватории. Для работы были приглашены В.Г. Фесенков, С.В. Орлов, Б.М. Щиголев, Р.В. Куницкий, К.Ф. Огородников. Позже сотрудниками стали Б.А. Воронцов-Вельяминов, С.К. Всехсвятский, Г.Н. Дубошин, Н.Д. Моисеев, Н.Н. Парицкий, Е.В. Пясковская, К.Н. Шистовский.

#### IV. ГРАФО – СМЕНА ЛИДЕРА И ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ

Возглавив в 1922 г. забастовочный комитет профессоров Московского университета, В.В.Стратонов навлек на себя немилость властей, и в октябре 1922 г. был выслан на так называемом «философском пароходе». Перед отъездом В.В.Стратонову удалось подобрать квалифицированного преемника своего начинания – В.Г. Фесенкова, под руководством которого организационный комитет ГРАФО был преобразован в Государственный астрофизический институт (ГАФИ, август 1922, с первым составом: П.Я. Давидович, В.Н. Милованов, С.В. Орлов, В.В. Стратонов, В.Г. Фесенков, Б.М. Щиголев). Процитируем оценку, которую ГАФИ получил позже от Наркомата просвещения: «Руководителем института В.Г. Фесенковым были приложены все усилия к тому, чтобы использовать одну из уже существующих обсерваторий в качестве наблюдательной базы в помощь теоретическим исследованиям, которые велись в Москве. Попытки создания таких отделений института в Ташкенте и в Новочеркасске кончились неудачей. Тем не менее, благодаря настойчивости В.Г.Фесенкова, возникла и окрепла собственная наблюдательная станция института в Кучине, в 18 км от Москвы, которая выросла сейчас во вполне удовлетворительно оборудованную обсерваторию – Кучинское отделение, на которой фактически ведутся проф. В.Г. Фесенковым и его сотрудниками разнообразные и интересные работы по фотометрии и колориметрии» [6].

Итак, в 20-х в Москве были созданы три астрономические организации: Астрономический институт (март 1921), Астрономо-геодезический научно-исследовательский институт (АГНИИ, 1922), и, на основе оргкомитета ГРАФО – Государственный астрофизический институт (ГАФИ, 1923). В состав последнего первоначально входили: Ташкентская обсерватория (руководить которой желающих тогда не нашлось), астрономические станции в Кучино (под Москвой), и в Новочеркасске (где ранее преподавал В.Г. Фесенков). По понятным причинам, первые экспедиции для выбора места строительства обсерватории были организованы в район Одессы и Северного Кавказа.

Всероссийский астрономический союз, претерпев многочисленные преобразования, изменив название на Ассоциацию астрономов РСФСР, после II (1920) и III (1924) съездов, прекратил свое существование на IV съезде, (1928, ~220 участников). Дальнейшее развитие идеи ГРАФО уже определялось не общественными желаниями, а ведомственным образом.

В 1931 г. по постановлению коллегии НКП три московских учреждения (обсерватория Московского университета, ГАФИ и астрономо-геодезический институт – АГНИИ), были объединены в Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга (ГАИШ).

В ГАИШ вошла также Кучинская обсерватория с астрофизическим профилем работы (после войны там разvивались исследования Солнца).

Итак, первая попытка организации крупной астрофизической обсерватории на юге России завершилась расширением возможностей и совершенствованием структуры столичных астрономических учреждений.

#### V. ГРАФО – ЭВОЛЮЦИЯ ПРОЕКТА

В докладе ГУС НКП (1921) была сформулирована прогрессивная идея: ГРАФО не должна быть сосредоточена на одном месте, а распределена по долготе (предполагалось организовать несколько астрономических станций, расположенных от Одессы до Владивостока). Кроме того, предполагалось устроить Горную астрономическую обсерваторию. В качестве центральной штаб-квартиры ГРАФО рассматривалась Одесса (где ранее обучался В.В.Стратонов), причем, кроме 12-летней *удовлетворительной* статистики по астроклимату, в качестве аргумента приводилась хорошая статистика подготовки кадров в Новороссийском университете. Реорганизация астрономических учреждений г.Петрограда привела к тому, что в проекте ГРАФО инициатива перешла к Ленинградскому Астрономическому институту (АИ). В апреле 1931 г. АИ провел совещание по Горной Астрономической Обсерватории (ГорАО, на юге СССР). Заслушали 43 доклада от 20 организаций и составили список необходимых инструментов. Предполагалось использовать 1931 год для посылки экспедиций по выбору места.

#### VI. ГРАФО – ПРОБЛЕМА ИНСТРУМЕНТОВ

Формирование парка астрономических инструментов началось с затянувшейся поставки ранее оплаченных изделий. В 1925 г. был получен рефлектор ( $D=102$  см), заказанный для Симеиза еще в 1913 г. На этом инструменте позже была выполнена программа измерения световых скоростей звезд [7], явившаяся самой упоминаемой работой советских спектроскопистов. Кроме того, в 1913 г. директором Пулковской обсерватории О.А. Баклундом был заказан рефрактор ( $D=81$  см), для установки в Николаеве, к 1921 г., т.е., столетию обсерватории. Это был бы крупнейший в Европе рефрактор, вопрос о строительстве которого поднимался и позже, последний раз в 1943 г. К 1924-26 гг. все оборудование, кроме объектива рефрактора, было готово и поставлено в СССР. К 1927 году советские заводы оптического стекла (г. Ленинград, г. Изюм) полностью покрывали потребности оптико-механической промышленности, и СССР отказался от импорта оптических изделий и компонентов.

В стремлении обойти диаметр телескопа Йеркса на один дюйм (т.е., поставить мировой рекорд в классе рефракторов), наши оптики соблазнились на 41-дюймовую заготовку от Chance Brothers & Co. Позже, при детальном анализе заготовка оказалась непригодной. Затем ситуацию исправляли уже у себя, в течение 14 лет (при этом заготовку из крома отливали  $> 15$  раз). Полировку линз выполнял Д.Д. Максутов.

В 1926 г. оборудование бывшей Варшавской обсерватории, эвакуированное ранее в г. Ростов-на-Дону, в соответствии с условиями мирного договора с Польшей, было передано польскому правительству. Таким обра-

зом, астрономический кабинет кафедры астрономии Донского университета (г.Ростов-на-Дону) остался без инструментов. Поэтому университетской обсерватории был предназначен цейссовский визуальный рефрактор ( $D=40$  см), приобретенный ранее для Пулкова, но в итоге оказавшийся в Абастумани.

В 1931 г. при Всесоюзном объединении оптико-механической промышленности (ВООМП) была организована комиссия астрономических приборов (КАП), с представителями от Пулковской обсерватории, Астрономического института (АИ), Ленинградского завода оптического стекла (ЛЕНЗОС). Согласно постановлению Астрономического комитета при НКП РСФСР, в июне 1932 г. были намечены к постройке на вторую пятилетку:

- 1) Рефлекторы  $D=30$  см, 3экз.,
- 2) Рефлекторы  $D=60$  см, 2экз.,
- 3) Рефлекторы  $D=100$  см, 2экз.,
- 4) Рефлектор  $D=150$  см, 1экз.,
- 5) Фотографический рефрактор  $D=81$  см (окончание работ), 1экз.,
- 6) Фотографический рефрактор  $D=50$  см, 1экз.,
- 7) Визуальные рефракторы  $D$  от 20 до 30 см (50экз.),
- 8) Кометоискатели  $D=15$  см (1:8), 8экз.,
- 9) Светосильные астрографы  $D$  до 50 см, 3экз.,
- 10) Короткофокусные астрографы  $D$  до 20 см (1:5), 5экз.,
- 11) Короткофокусные астрографы  $D=10$  см (1:3), 5экз.,
- 12) Астрографы для службы звезд, 2экз.,
- 13) Длиннофокусные спектрографы, 3экз.,
- 14) Короткофокусные спектрографы, 4экз.,
- 15) Спектрофотометры, 10экз.,
- 16) Лабораторные спектрографы, 10экз.,
- 17) Объективные призмы, 20экз.,
- 18) Солнечные телескопы, 2экз.,
- 19) Спектрографии, 3экз.,
- 20) Спектрографиоскопы, 3экз.,
- 21) Установки для наблюдений затмений, 5экз.

Вторая половина 30-х годов характеризуется активной приборостроительной деятельностью в уже сформированных астрономических учреждениях. Лидером здесь являлся Ленинградский Астрономический институт, возглавляемый Б.В. Нумеровым, рис. 2.



Рис. 2. Борис Васильевич Нумеров  
(1891-1941)

Кроме знаменитой работы по созданию первого отечественного рефлектора ( $D=33$  см, рис. 3, [8]), был построен первый небулярный спектрограф с оригинальным решением узла дисперсии [9], была разработана светосильная камера системы Б.Шмидта [10], по наблюдениям на многообъективной установке была впервые зарегистрирована структура внешних областей туманности Андромеды и её спутника [11]. В АИ был разработан также первый отечественный электрофотометр. К сожалению, результаты этих работ были опубликованы частично и с большим опозданием.



Рис. 3. Первый советский телескоп-рефлектор. Разработан и изготовлен в период 1928-1932 г.г. Имеет четыре оптические схемы (система Ньютона; две – системы Кассегрена, где пучок проходит в полулю полярную ось или в полулю ось склонения; а также система с параллельным пучком в полулю ось склонения). Вся оптика и механика (кроме часового механизма) – были отечественного производства

В начале 30-х под руководством Н.Г.Пономарёва было разработано и изготовлено первое зеркало с сотовой структурой ( $D=100$  см) [12]. Весной 1941 года Н.Г. Пономарёв и Д.Д. Максутов за создание Пулковского горизонтального солнечного телескопа были удостоены Сталинской премии. Работая в блокадном Ленинграде по оборонной тематике, Н.Г. Пономарев подготовил записки в Академию наук [13]. Приведем лишь последние строки этих записок, обнаруженных Б.К. Иоаннисиани, главным конструктором 6-метрового телескопа БТА, только через 25 лет: «Применение азимутальной установки для больших современных светосильных телескопов-рефлекторов, несомненно, имеет большие перспективы и открывает возможности их построения иным, более современным путем. Эта установка, помимо своей простоты, обладает также большей устойчивостью, жесткостью и удобствами во время наблюдения».

Итак, в отличие от московского периода, идеи ГРАФО стимулировали не только реорганизацию астрономических учреждений Ленинграда, но и развитие отечественных оптико-механических технологий, причем с оценкой далеких перспектив.

#### VII. ГРАФО – ИССЛЕДОВАНИЯ АСТРОКЛИМАТА

Кратко остановимся на попытках астроклиматических исследований. Первая экспедиция (конец ноября и первая половина декабря 1921 г.) проведена на Крестовой горе ( $h=887$  м, сейчас в городской черте Кисловодска). Здесь, по-видимому, еще сказалось влияние

В.В. Стратонова. В 1925-1926 гг. были проведены экспедиции московских астрономов в Крыму. Позже задача выбора места для ГорАО была поручена Астрономическому институту (АИ, Ленинград). В 1930 г. был обследован район Нагорного Карабаха в Азербайджане, в 1931 г. – Крым, склоны горы Алазез в Армении, город Ош в Фергане, районы Боржоми и Кахетии в Грузии. В 1932 г. были обследованы Северный Кавказ, Сванетия и другие районы Грузии. Использовались «кочующие инструменты» – в течение ночи удавалось обследовать 2-3 пункта, за счет перевозки небольшого инструмента по железной дороге. Как первый результат выбора места, Астрономический институт предложил организовать горную обсерваторию в Абастумани. Не исключено, что здесь сказалось влияние проф. С.П. Глазенапа, выполнявшего здесь визуальные астрономические наблюдения (на рефракторе D=22 см) в последнее десятилетие XIX века [14]. Поэтому район Абастумани явился единственным местом на Кавказе, где задолго до принятия решения о дислокации ГРАФО были проведены систематические многолетние наблюдения. Районы Северного Кавказа и Закавказья еще подлежали обследованиям, когда 28.02.1932 было принято постановление СНК Грузии об организации обсерватории. Летом 1932 в Абастумани установлен рефлектор (D=33 см), разработанный Н.Г. Пономаревым в АИ (г. Ленинград). При конструировании экваториальной установки рефлектора (1931) уже была заложена географическая широта Абастумани.

### VIII. ГРАФО И НАЦИОНАЛЬНАЯ НАУКА

В начале 20-х годов вопрос об организации Горной Обсерватории являлся российским. Но в период развития и укрепления союзных республик Средней Азии и Южного Кавказа был поднят вопрос об организации республиканских научных (в том числе и астрономических) центров на юге СССР. Совещание 1931 г. (АИ) отмечало инициативу Научно-Исследовательского Института Азербайджана в Баку и Геофизического Института Грузии в Тифлисе. Кроме того, создание единой Гидрометеорологической службы в СССР, необходимость более глубокого изучения процессов в атмосфере в связи с деятельностью Солнца, еще в большей степени пробудило интерес к организации Горной Обсерватории.

После возвращения (1929) Б.П.Герасимовича (Харьков) и Б.В.Нумерова (Ленинград) из серии зарубежных научных командировок, одновременно были предложены два проекта: Харьковской Обсерваторией – создание большого астрономического центра в степной полосе Украины, и Астрономическим Институтом (Ленинград) – организация Горной Обсерватории на юге СССР.

На совещании 1931 г. был также заслушан доклад Н.П.Барабашова об организации на Украине большой Астрономической Обсерватории современного типа, «главными задачами которой является исследования Солнца, планет и строение звездного мира, имеющие целью увязку астрофизических проблем с задачами социалистического строительства». Характерным отметим, что «совещание признает целесообразным осуществление на Украине крупного астрономического центра, отмечая необходимость согласования планов и программ работ с планами других астрономических обсерваторий Союза и, в особенности, с планом строительст-

ва ГорАО». Таким образом, идея создания ГорАО еще на этапе обсуждения трансформировалась в планы удовлетворения притязаний республик на создание своих астрономических центров (в не исследованных, и, как впоследствии выяснилось, непригодных районах).

Солнечная комиссия (КИСО), занимаясь разработкой пятилетнего плана будущей астрофизической обсерватории, наблюдения на которой предполагалось начать в 1934 г., создала специальную комиссию, в составе: А.А. Белопольского, Д.С. Рождественского, Б.В.Нумерова, В.А. Амбарцумяна, Н.Г. Пономарева, С.Н. Блажко, В.Г. Фесенкова, А.А. Канчесева, Д.И. Еропкина, по выбору места для солнечной обсерватории. В результате «щательного обследования» комиссия установила, что наиболее благоприятным местом (число ясных дней, качество изображений, и «довольно удобное сообщение с культурным центром»), являются окрестности Ростова-на-Дону [15]. Отметим, что, начиная с 20-х, практически во всех предложениях по созданию новых обсерваторий одним из основных требований являлось нахождение обсерватории вблизи «какого-нибудь культурного центра» и наличие охранной зоны (не менее пяти верст вокруг обсерватории), где запрещалась иная хозяйственная деятельность, см., например, [5].

В результате усилий, начатых в 20-х под лозунгом создания ГРАФО, в довоенный период были организованы следующие астрономические учреждения: Полтавская гравиметрическая обсерватория АН УССР (1926 г.), Китабская международная широтная станция (1930 г.), Иркутская астрономическая обсерватория (1931 г.), Абастуманская астрофизическая обсерватория АН Грузинской ССР (1932 г.), Стalinabadская обсерватория АН Таджикской ССР (1932 г.), Свердловская астрономическая обсерватория университета (1933 г.).

### IX. Выводы

Подведем итоги развития идеи ГРАФО:

*A.* Вначале состоялось разделение функций: Москва – преимущественно организационные меры по объединению столичных учреждений, Ленинград – организационные меры (создание АИ), с последующим развитием отечественных оптико-механических технологий.

*B.* Очевидна переоценка возможностей проектирования и производства астрономических инструментов, что привело к непомерной нагрузке на оптико-механическую промышленность (ОМП), где во 2-й половине 30-х уже преобладали оборонные заказы.

*C.* Малочисленность, местничество, и конкуренция лидеров региональных астрономических учреждений, в сочетании с дефицитом времени на доказательные астроклиматические исследования [16–19]. Астрономам удалось ввести четвертый (ночной, в 1ч.) срок для службы гидрометеорологических наблюдений, что в дальнейшем позволило перейти к объективным оценкам ночной облачности.

*D.* Протяженность СССР по долготе явила козырем для службы Солнца, под это направление были созданы инструменты, в дальнейшем выпускавшиеся серийно.

Е. Кадровые потери (репрессированы И.А. Балановский, Б.П. Герасимович, Н.И. Днепровский, Д.И. Еропкин, Н.И. Командантов, Б.В. Нумеров, Е.Я. Перепелкин, П.И. Яшинов и др.) В основном пострадали Пулковская обсерватория и Астрономический институт.

Ж. Реформаторский суд в организации образования и науки в довоенное время (закрытие и последующее открытие университетов; отмена научных степеней, с их последующим восстановлением; ежегодные изменения учебных программ и дефицит учебников; коллективная отчетность студенческих групп – успеваемость «пятерки» оценивалась по лучшей оценке из пяти) – не способствовал процессу подготовки кадров.

З. Практический опыт астроклиматических исследований был невелик, первые теоретические представления появились позже [20], поэтому выбор места, подсматриваемый директивными сроками, основывался на оценках «анонимных» предшественников, ссылаясь на которых не рекомендовалось.

И. Концепция Данжона-Кудэ [20] являлась основой послевоенных астроклиматических программ СССР по поиску места для САО АН СССР. Описание этого этапа можно найти в [21], стр. 8-109.

К. И главная, до сих пор нерешенная проблема. Обсерваторию предполагается строить в районе, бесперспективном в промышленном отношении. Такой район, по определению, не имеет местного резерва квалифицированных инженерных кадров и пониженный образовательный уровень. Да и не все ученые соглашались на жизнь в удалении от городской «цивилизации».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Panchuk V.E., Afanas'ev V.L.* Astroclimate of Northern Caucasus – Myths and reality // Astrophysical Bulletin. – 2011. – Vol. 66, Iss. 2. – P. 233-254.
2. Кононович А.К. Из протокола заседания Совета университета 29.10.1881 // Записки Новороссийского университета. – Одесса, 1882. – Т. 34. – С. 209-210.
3. *Svoboda J.* Vsevolod Viktorovich Strattonov // Rise hvezd. – 1938. – №. 7. – P. 172-174.
4. *Бронштэн В.А.* Всеволод Викторович Стратонов: биографическая справка // На рубежах познания вселенной: историко-астрономические исследования. – М., 1992. – Вып. 23. – С. 403-410.
5. *Стратонов В.В.* Главная Российская астрофизическая обсерватория // Труды Главной Российской астрофизической обсерватории. – 1922. – Т. 1. – С. 1-27.
6. НарКомПро РСФСР, ОНТИ, М-Л, 1935.
7. *Albitsky V.A., Shajin G.A.* The radial velocities of 343 stars // Izvestiya Glavnoj Astronomicheskoy Observatorii v Pulkove. – 1933. – Vol. 2, No. 43.
8. Русский Астрономический календарь, 1933, вып. XXXVI.
9. *Леонтовский М.П.* Небулярный спектрограф // Бюллетень Астрономического института. – 1944. – № 53. – С. 500-508.
10. *Леонтовский М.П.* Аппарат для изготовления линз Шмидта // Бюллетень Астрономического института. – 1944. – № 53. – С. 493-500.
11. *Леонтовский М.П.* Структура внешних областей туманности Андромеды и ее спутника // Бюллетень Астрономического института. – 1944. – № 53. – С. 490-493.
12. *Пономарев Н.Г.* Новый метод изготовления стеклянных дисков для астрономических зеркал // Бюллетень Астрономического института. – 1934. – № 36. – С. 271-272.
13. *Пономарев Н.Г.* К вопросу о применении азимутальной установки для больших телескопов-рефлекторов // Акад. Наук. Главн. Астроном. Обсерв. Пулково. 17-1-42 г.»
14. *Burnham S.W.* Astronomy in Russia // Astronomy and Astrophysics. – 1893. – Vol. XII, No. 117. – P. 595-596.
15. *Воробьева Е.Я.* Работа А.А. Белопольского в комиссии по исследованию Солнца // Вопросы истории астрономии. – 1974. – Вып. 3. – С. 139-159.
16. Краткая программа по выбору места Горной Астрономической обсерватории // Бюллетень Астрономического Института. – 1931. – № 29. – С. 95-102.
17. *Харадзе Е.К.* К характеристике некоторых горных районов Грузии с точки зрения их пригодности для постройки обсерватории // Бюллетень Астрономического института. – 1935. – № 38. – С. 313-322.
18. *Харадзе Е.К., Никонов В.Б.* О результатах экспедиции 1931 года в горные районы Грузии по подысканию места для горной астрономической обсерватории // Бюллетень Астрономического института. – 1935. – № 38. – С. 322-339.
19. *Добронравин П.П.* Северокавказская экспедиция Астрономического института в 1932 г. // Бюллетень Астрономического института. – 1935. – № 38. – С. 345-349.
20. *Danjon A., Couder A.* Lunettes et Telescopes. 1935. (Атмосферное волнение // Астрономический журнал. – 1940. – Т. 17, № 1: перевод Д. Максутова).
21. Копылов И.М. – полвека в астрофизике. САО РАН, Нижний Архыз, 2003. – 172 с. Ред. Ю.Ю. Балега и В.Г. Ключкова.

# Влияние аккумулирующих способностей элементов котла на температуру рабочей среды

**Ефимов Николай Николаевич**  
 Южно-Российский  
 государственный  
 политехнический университет  
 (Новочеркасский политехнический  
 институт) им. М.И. Платова,  
 Новочеркасск. Россия,  
*Efimovnn40@mail.ru*

**Тырникова Юлия Владимировна**  
 Южно-Российский  
 государственный  
 политехнический университет  
 (Новочеркасский политехнический  
 институт) им. М.И. Платова,  
 Новочеркасск. Россия

**Дьяконов Евгений Михайлович**  
 Южно-Российский  
 государственный  
 политехнический университет  
 (Новочеркасский политехнический  
 институт) им. М.И. Платова,  
 Новочеркасск. Россия

**Аннотация.** В работе обосновывается причина колебаний температуры перегретого пара в пароперегревателе котла тепловой электростанции с учетом аккумулирующей способности рабочей среды. Показано, что эти изменения температур происходят только в пароперегревателях барабанных и прямоточных котлов, что заставляет для пара выполнять более сложную систему автоматизации.

**Abstract.** The paper substantiates the reason for the fluctuations in the temperature of superheated steam in the superheater of the boiler of a thermal power plant, taking into account the accumulating capacity of the working medium. It is shown that these temperature changes occur only in superheaters of drum and direct-flow boilers, which forces a more complex automation system to be performed for steam.

**Ключевые слова.** Тепловая электростанция, перегретый пар, рабочая среда, барабанный и прямоточный котел.

**Keywords.** Thermal power plant, superheated steam, working medium, drum and direct-flow boiler.

При переменных режимах работы в металле труб пароперегревателей котлов тепловых электростанций происходят колебания температур с амплитудой до  $40\dots100^{\circ}\text{C}$  за сравнительно короткий промежуток времени ( $1\dots2$  мин) [1–3]. В условиях эксплуатации наблюдаются и тепловые удары, когда скорость изменения температуры металла превышает  $100^{\circ}\text{C}/\text{s}$ . Поэтому элементы котла испытывают большие температурные напряжения, превышающие напряжения нормальной эксплуатации, в результате чего возникают разрушительные процессы, усиливающиеся циклическими колебаниями температур.

Термомеханические процессы энергетических объектов во многом определяются их аккумулирующими способностями. Поэтому даже при мгновенной смене тепловой мощности установки процесс изменения параметров растягивается на продолжительное время. Стабилизация параметров, как известно [1], при изменении режима работы энергооборудования происходит в течение 1–3 часа. Поскольку регулирование нагрузки в течение суток требует неоднократного изменения тепловой мощности энергоблоков, а каждое такое изменение нагрузки сопровождается длительной стабилизацией параметров, то в течение суток многие объекты ТЭС большую часть рабочего времени находятся в нестационарных режимах, как по нагрузке, так и по изменению

параметров. Динамичность любого теплового объекта описывается: способностью аккумулировать тепло в элементах пароводяного тракта котла; изменением параметров и тепловым взаимодействием объекта с окружающей средой. При переходных режимах в них происходит естественное перераспределение тепла с неодинаковыми разгонными характеристиками. Апериодические изменения температур одного элемента котла при переменных режимах могут сопровождаться колебательными процессами температуры другого элемента.

Для  $i$ -го элемента пароводяного тракта котла (водяной экономайзер, испарительные поверхности нагрева, пароперегреватель, металл) тепловая нагрузка изменяется по уравнению

$$dQ_i = dQ_{exi} - dQ_{vixi} + dQ_{nomi},$$

$$\text{где } Q_{exi} = D_{exi} h_{exi} = D_{exi} c_{exi} t_{exi}; \quad (1)$$

$$Q_{vixi} = D_{vixi} h_{vixi} = D_{vixi} c_{vixi} t_{vixi};$$

где для каждого теплоносителя (пар или вода) на входе и выходе  $i$ -го элемента котла:

$Q_{exi} Q_{vixi}$  – тепловой поток,  $\text{кДж}/\text{с}$ ;  
 $D_{exi}, D_{vixi}$  – расходы,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  
 $h_{exi}, h_{vixi}$  – энтальпии,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  
 $c_{exi}, c_{vixi}$  – удельные теплоемкости,  $\text{кДж}/(\text{кг К})$ ;  
 $t_{exi}, t_{vixi}$  – температуры,  $K$ ;  
 $Q_{nomi}$  – потери тепла при теплообмене,  $\text{кДж}/\text{с}$ .

Известно [4], что для нестационарного режима любого теплообменника в общем виде можно записать следующее уравнение

$$\sum_{i=1}^n Q_{exi} - \sum_{j=1}^m Q_{vixj} = \sum_{l=1}^k \frac{dQ_{akl}}{dt}, \quad (2)$$

где  $Q_{ex}$  – тепло, вносимое в теплообменник теплоносителями (например, газом, паром, водой и др.),  $\text{кДж}/\text{с}$ ;

$Q_{vix}$  – тепло, уносимое из теплообменника теплоносителями,  $\text{кДж}/\text{с}$ ;

$Q_{ak}$  – тепло, аккумулируемое в объемах теплоносителей, металла, обмуровки и др.,  $\text{кДж}$ , определяемое по известному уравнению

$$Q_{ak} = V\rho c t, \quad (3)$$

где  $\rho, c, t$  – плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , теплоемкость,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  и температура,  ${}^\circ\text{C}$ , рабочей среды, находящейся в объеме  $V$ .

Анализ показывает, что при ступенчатом изменении какого-то параметра в уравнении (2) (например, расхода одного из теплоносителей) действует апериодическая закономерность изменения других составляющих. Аккумулирующие способности сред, занимающих объем теплообменника, играют роль успокаивающего фактора. Следовательно, при переходных режимах изменение количества тепла, аккумулированного в объеме теплообменника, происходит за счет появляющегося небаланса между подводом и отводом тепла теплоносителям. Однако темпы изменения аккумуляции тепла зависят от интенсивности теплообмена сред, их теплофизических параметров и тепловых эквивалентов.

Потери тепла при стационарном процессе могут также определяться уравнением (2). Их можно представить процессом накопления тепла в окружающей среде и тогда  $dQ_{akoc}/d\tau \neq 0$ . При бесконечно долгом процессе теплообмена между теплообменником и окружающей средой можно принять, что  $dQ_{akoc}/d\tau = \text{const}$ .

Для стационарного режима с учетом потерь уравнение (2) можно записать в виде:

$$\sum_{i=1}^n Q_{exi} - \sum_{j=1}^m Q_{vыхj} - \Delta Q_{nom} = 0.$$

Потери тепла здесь рассматриваются как процесс накопления (аккумуляции) тепловой энергии в окружающей среде, а уравнение (2) действительно и для стационарного режима. Сравнивая уравнения (1) и (3), а также полагая, что аккумулируемое в объеме теплообменника тепло влияет на параметры среды, покидающей теплообменник, принимаем

$$Q_{ak} = T \Delta Q_{vых},$$

где  $\Delta Q_{vых} = Q_{vых} - Q_{vых.0}$  – максимальное изменение тепловой нагрузки на выходе из теплообменника,  $\text{кДж}/\text{с}$ ;

$Q_{vых.0}$  – тепловой поток на выходе из теплообменника до появления возмущения,  $\text{кДж}/\text{с}$ ;

$T$  – постоянная времени,  $\text{с}$ , которая является функцией;

$$T = f\left(\frac{\rho V}{D}; \frac{t_{ex}}{t_{vых}}; \frac{c_{ex}}{c_{vых}}\right).$$

С учетом уравнений (1, 2) постоянную времени можно найти как

$$T = \frac{\rho V c t}{2 D_{vых} c_{vых} t_{vых}} = \frac{\rho V}{8 D_{vых}} \left( \frac{c_{ex}}{c_{vых}} + 1 \right) \left( \frac{t_{ex}}{t_{vых}} + 1 \right).$$

Здесь предполагается, что параметры  $\rho, c$  и  $t$  являются осредненными по теплообменнику. Величины  $\Delta Q_{ex}$  и  $\Delta Q_{vых}$  – также осредненные суммирующие относительные изменения входных и выходных тепловых потоков теплообменника,  $\text{кДж}/\text{с}$ .

Учитывая все преобразования и сделав необходимые подстановки, уравнение теплового баланса (2) для переменных режимов можно представить в следующем виде:

$$T \frac{dQ_{vых}}{d\tau} + \Delta Q_{vых} = k \Delta Q_{ex}.$$

где  $\Delta Q_{ex} = Q_{ex} - Q_{ex.0}$  – максимальное изменение тепловой нагрузки на входе в теплообменник,  $\text{кДж}/\text{с}$ ;

$k$  – коэффициент передачи.

Отсюда изменение тепловой нагрузки на выходе из поверхности нагрева котла при переходном режиме можно определить по уравнению

$$Q_{vых} = Q_{vых.0} + \Delta Q_{ex} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{T}\right) \right].$$

Во всех элементах тепломеханического оборудования энергоблоков при изменении температурного режима проявляется процесс аккумуляции тепла, который возможен не только в теплоносителях отдающих (например, топочные и уходящие газы в котле) и принимающих (пар, вода) тепло, но и в конструкциях (металл, обмуровка и др.) ограждающих это оборудование. Следовательно, в котельном агрегате при переменном режиме происходит аккумуляция тепла [5], которая складывается из накопления тепла каждым элементом котла в отдельности, которая находится по уравнению

$$\frac{dQ_{akk}}{d\tau} = \sum \left( \frac{dQ_{mi}}{d\tau} + \frac{dQ_{obi}}{d\tau} + \frac{dQ_{mi}}{d\tau} + \dots \right),$$

где  $Q_{mi}$ ,  $Q_{obi}$ ,  $Q_{mi}$  – количество тепла, аккумулируемое соответственно металлом, обмуровкой, теплоносителем  $i$ -го элемента или участка котла,  $\text{кДж}$ .

Поскольку теплоемкость металла изменяется всего на 2,5...3,0 % при колебаниях температуры в пределах  $100 {}^\circ\text{C}$ , то можно принимать  $c_{mi} \equiv const$ . Отсюда изменение аккумулируемого тепла в металле определяется в основном изменением его температуры

$$\frac{dQ_m}{dt} = G_m c_m \frac{dt_m}{dt}.$$

Изменение теплоты, накапливаемой обмуровкой  $\frac{dQ_{ob}}{dt}$ ,

определяется так же, как и для металла. Однако теплоемкость и плотность любого обмуровочного материала намного меньше, чем у металла, что соответственно сказывается на аккумулировании тепла в обмуровке. Учитывая это, а также то обстоятельство, что в котле обмуровкой покрыты только коллекторы и трубы, можно принимать

$$\frac{dQ_{ob}}{dt} \equiv 0$$

Для того чтобы понять природу неконтролируемых колебаний температуры в поверхностях нагрева прямоточного котла при переменных режимах, рассмотрим более подробно возможное изменение аккумулируемого тепла в объемах теплоносителей подогревателя, которое влияет на выходной тепловой поток [5]. Для пароводяного пространства поверхностей нагрева прямоточного котла, с учетом уравнения (3), после дифференцирования и преобразований, получим уравнение

$$\frac{dQ_{ak}}{dt} = \left\{ V \left[ \rho c + t \frac{\partial(\rho c)}{\partial t} \right] + t \rho c \frac{\partial V}{\partial t} \right\} \frac{dt}{d\tau}. \quad (4)$$

Объём газа или пара в теплообменнике можно представить в виде  $V = mv$ , где  $m$  – масса среды,  $k\text{g}$ ;  $v$  – удельный объём среды,  $\text{m}^3/\text{k}\text{g}$ .

Предположим, что в паровом пространстве изменение объёма среды происходит только за счет увеличения или уменьшения удельного объёма при неизменной массе пара в теплообменнике, что характерно для пароперегревателя прямоточного котла, т.е.  $dV = V\rho dv$ . Тогда уравнение (4) преобразуется к виду

$$\frac{dQ_{ak}}{dt} = V \left[ \rho c + t \frac{\partial(\rho c)}{\partial t} + t \rho^2 c \frac{\partial v}{\partial t} \right] \frac{dt}{d\tau} = VA \frac{dt}{d\tau}, \quad (5)$$

где  $A = \rho c + t \frac{\partial(\rho c)}{\partial t} + t \rho^2 c \frac{\partial v}{\partial t}$  – вспомогательный параметр, характеризующий аккумулирующие способности поверхности нагрева прямоточного котла.

В барабанных котлах объём пароперегревательной части не изменяется ( $V_{nn}=const$ ) при увеличении или уменьшении температуры. Поэтому уравнение (5) упрощается, поскольку исчезает слагаемое, где  $\partial v/\partial t = 0$ . Для прямоточного котла пароперегревательная часть изменяет свой объём ( $\partial V/\partial t \neq 0$ ), при этом вспомогательный параметр  $A$  увеличивается.

На рис. 1 графически показано изменение параметра  $A$  для пароперегревателя прямоточного котла в зависимости от температуры и давления водяного пара. Видно, что при постоянных давлениях и их значениях более 10 МПа температура пара, а вместе с ним и параметр  $A$  может резко и значительно изменяться. Это, например, происходит при регулировании температуры впрыском котловой воды. В прямоточном котле за период пуска параметр  $A$  может последовательно изменяться от +150 кДж/м<sup>3</sup>К до -20 кДж/м<sup>3</sup>К, что значительно выше, чем для барабанных котлов, для которых эта величина изменяется в пределах от +15 до -100 кДж/м<sup>3</sup>К.

Из рис. 1 видно, что при температурах 540...580 °C появляется возможность резких изменений параметра  $A$  при их плюсовых значениях.

Для водяного экономайзера величина  $A$  всегда положительная и имеет значения более 2000 кДж/м<sup>3</sup>К.

Таким образом, регулирование температуры пара на котле ТЭС является наиболее сложным. Оно имеет три входных сигнала по температуре, один из которых проходит через дифференциатор. Повышенные термические напряжения металла труб котла зависят не только от амплитуды колебаний температуры и давления, но и от ее скорости изменения. Все это оказывают влияние на надежность работы котельного оборудования ТЭС.

В замкнутом пароводяному пространстве прямоточного котла, когда  $V_{\Sigma} = V_{es} + V_{uc} + V_{nn}$ , с увеличением температуры увеличивается объём парового пространства ( $V_{nn}$ ), что приводит к уменьшению объёма испарительных поверхностей нагрева ( $V_{uc}$ ) на такую же величину

при неизменном объёме водяного экономайзера ( $V_{es}$ ). Тогда уравнение (5) справедливо только для пароперегревательных поверхностей нагрева прямоточных котлов.

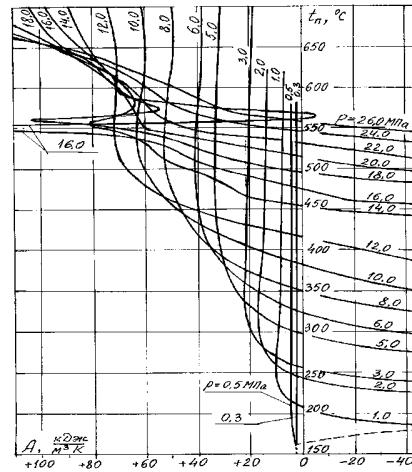


Рис. 1. Зависимость параметра  $A$  от температуры и давления пара для прямоточного котла

Изменение аккумулируемого тепла в испарительной части прямоточного котла тогда, используя (4, 5), можно определить по уравнению

$$\frac{dQ_{ak,uc}}{dt} = V_{uc} \left[ \rho_{uc} c_{uc} + t_{uc} \frac{\partial(\rho_{uc} c_{uc})}{\partial t_{uc}} - t_{uc} \rho_{uc} \rho_{nn} c_{uc} \frac{V_{nn} \partial V_{nn}}{V_{uc} \partial t_{nn}} \right] \frac{dt_{uc}}{dt}. \quad (6)$$

В уравнении индексы обозначают:  $uc$  – пароводянная смесь в испарительных поверхностях нагрева;  $nn$  – паровая среда пароперегревателя прямоточного котла.

В испарительных поверхностях нагрева изменение объёма при переходном режиме приводит к ухудшению условий протекания процесса. Однако для пароводянного объёма экранных труб прямоточного котла это ухудшение не создает отрицательных ситуаций. Здесь неконтролируемые колебания температур не происходит, поскольку, если судить по расчетному анализу уравнения (6) вспомогательный параметр  $A$  в любом случае имеет высокие значения (более 3000 кДж/м<sup>3</sup>К).

## ЛИТЕРАТУРА

- Федорченко Г.С., Мадоян А.А., Ефимов Н.Н. О надежности работы пароперегревателей котлов с естественной циркуляцией // Теплоэнергетика. – 1997. – № 4. – С. 54-57.
- Гладышев Г.П., Аминов Р.З., Гуревич В.З. и др. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС: учеб. пособие для теплоэнергетических и энергомашиностроительных вузов / под ред. А.И. Андрющенко. – М.: Выш. шк., 1991. – 303 с.; ил.
- Ефимов Н.Н., Тырникова Ю.В. Причины возникновения колебаний температуры пара на выходе из котла. Системный синтез и прикладная синергетика // Межд. научн. конференция 03–05 октября 2006 г. Пятигорск: Сборник докладов. – Пятигорск: РИА-КМВ, 2006. – 400 с. с ил. – С.287-290.
- Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). – М.: Энергия, 1973. – 295 с.
- Ефимов Н.Н. Основные закономерности изменения количества аккумулированного тепла в пароперегревателях // Теплоэнергетика. – 1999. – № 11. – С. 36-40.

# Комбинированный метод синергетического синтеза законов управления пространственным движением БПЛА с жестким крылом в условиях ветровых возмущений

**Веселов Геннадий Евгеньевич**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*gev@sedu.ru*

**Ингабире Алин**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*ingabire@sedu.ru*

**Аннотация.** В работе предлагается метод синергетического синтеза законов управления беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) с жестким крылом для продольного и бокового движения в условиях ветровых возмущений. Основной целью работы является проведение исследования поведения БПЛА с синтезированными синергетическими законами управления продольным и боковым движением при их совместном действии. Эффективность предлагаемого подхода к синергетическому синтезу стратегий управления подтверждается результатами компьютерного моделирования. Разработанные программные продукты позволяют осуществлять синтез и моделирование замкнутых систем управления БПЛА в соответствии с предложенной процедурой метода синергетического синтеза законов управления пространственным движением БПЛА при разделении задач продольного и бокового движения в условиях ветровых возмущений.

**Abstract.** This paper proposes a synergistic synthesis method for the control laws of fixed-wing unmanned aerial vehicle (UAV) for longitudinal and lateral motion in the presence of wind disturbances. The main purpose of this work is to study the behavior of UAV with synthesized synergistic control laws of longitudinal and lateral motion when they are combined together. The effectiveness of the proposed approach to the synergistic synthesis of control strategies is proved by the results of computer modeling. The developed software allows the synthesis and modeling of closed-loop UAV control systems in accordance with the proposed procedure of the method of synergistic synthesis of the control laws of longitudinal and lateral motion of UAV under the influence of wind disturbances.

**Ключевые слова:** БПЛА с жёстким крылом, продольное движение, боковое движение, нелинейное управление; синергетическая теория управления, ветровые возмущения; инвариантное многообразие.

**Keywords:** Fixed-wing UAV, longitudinal motion, lateral motion; nonlinear control, synergistic control theory, wind disturbances, invariant manifold.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается бурное развитие применения БПЛА с жестким крылом в гражданской сфере. Данный тип БПЛА отличается по техническим характери-

стикам от других сопоставимым по массогабаритным размерам типов БПЛА тем, что БПЛА с жестким крылом способны совершать автономные полеты более длительное время, они могут осуществлять полеты на большей высоте и с большей скоростью. За счет этого они находят применение при обследовании территорий [1] и доставки небольших грузов [2] в труднодоступные районы. БПЛА с жестким крылом находят все большее применение в научных исследованиях и разведке, агропромышленном комплексе, мониторинге природы, освещении спортивных и развлекательных мероприятий, [3–5] и т.д.

Одним из главных факторов, ограничивающих применение БПЛА с жестким крылом, является сильный ветер, поскольку он может оказывать такое влияние на БПЛА, которое приведет к существенным отклонениям от желаемых траекторий движения, что, в свою очередь, может привести к нештатным ситуациям и авариям [6–10]. Следует отметить, что для того, чтобы иметь возможность осуществлять выполнение технологической задачи в ветреную погоду, необходимо при синтезе законов управления БПЛА с жестким крылом учитывать влияние ветровых возмущений. Таким образом, одной из важнейших научно-технических задач, решаемых при проектировании систем управления движения автономных БПЛА является задача синтеза законов управления, обеспечивающих максимальную область устойчивого движения по заданному маршруту в условиях действия ветровых возмущений. Очевидно, что решение такой задачи возможно при применении методов синтеза управляющих воздействий, максимально учитывающих нелинейные свойства математических моделей пространственного движения, обеспечивающие асимптотически устойчивое движение БПЛА с жестким крылом и инвариантное поведение к действию ветровых возмущений.

Нелинейные методы управления, разработанные для рассматриваемого класса систем, включают метод бэкстеппинг – Backstepping [11, 12], метод нелинейного управления с прогнозирующей моделью – Nonlinear model predictive control [13, 14], управление со скользящим режимом – Sliding mode control [15, 16], Nested saturation control [17, 18], нечёткое управление – Fuzzy

logic control [19],  $H_\infty$ -управление – H-infinity control [20, 21], метод динамической инверсии – Dynamic inversion [22, 23], методы адаптивного управления – Adaptive control [24] и метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [25, 26].

Проведенный обзор существующих подходов к синтезу автопилотов БПЛА позволил выделить их основные особенности, а также достоинства и недостатки, которые представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА

Метод	Достоинства	Недостатки
Линейное управление	Простота процедур синтеза. Низкие вычислительные затраты.	Синтез осуществляется по линейным моделям. Не гарантируется устойчивость системы при больших отклонениях. Не учет нелинейных связей приводит к неэффективному управлению.
Бэкстеппинг	Допускается использование моделей с неопределенностью. Гарантируется асимптотическая устойчивость замкнутых систем.	Предполагает измерение полного вектора состояния системы. Отсутствие ограничений на управляющие воздействия. Отсутствует возможность синтеза векторных законов управления.
Управление со скользящим режимом	Адаптация к действию внешних возмущений и робастность. Простая структура. Гарантирование устойчивости.	Существенное влияние скользящего режима на точность управления и стабильность системы
Адаптивное управление	Адаптация к действию внешних и внутренних возмущений	Эффективность синтезируемых систем только к влиянию параметрической неопределенности Как правило требуется проведения дополнительных настроек регуляторов
Нечёткое управление	Возможность применения для систем с неопределенностями.	Не гарантирует высокой точности систем управления и необходимых динамических показателей качества.
Метод АКАР	Полный учет нелинейностей модели. Возможность проектирования векторных систем управления. Аналитичность всех процедур синтеза. Гарантирование асимптотической устойчивости во всей допустимой области изменения фазовых координат системы. Робастность и адаптивность проектируемых систем. Синтез наблюдателей состояния, возмущения и параметров системы.	Вычислительная сложность алгоритмов управления

Таким образом, проведенный обзор методов показывает, что наиболее оптимальным с точки зрения проектирования систем управления, гарантирующих асимптоти-

тически устойчивое поведение синтезируемых систем, а также учета нелинейных свойств объекта, возможности проектирования согласованного векторного управления является метод АКАР. В данной работе рассматривается исследование системы пространственного движения БПЛА с жестким крылом при взаимодействии систем управления продольным и боковым движением и также в работе предлагается применение теории и методов синергетической теории управления (СТУ) [27, 28] к задаче синтеза систем управления для БПЛА с жестким крылом в условиях ветровых возмущений. Достоинством данного подхода состоит в том, что он позволяет значительно улучшить процедуру синтеза за счет учета нелинейности поведения БПЛА и ветровых возмущений.

## II. СИНТЕЗ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ БПЛА В УСЛОВИЯХ ВЕТРОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

### A. Математическая модель БПЛА

Пусть  $(V_k, \theta, \omega_z, x, H, \vartheta) \in \mathbb{R}^6$  – это будет вектор пространства состояний БПЛА, где  $V_k$  – аэродинамическая скорость;  $\theta$  – угол наклона траектории;  $\omega_z$  – угловая скорость тангажа вокруг оси  $z$ ;  $x$  – дальность полета;  $H$  – высота полета;  $\vartheta$  – угол тангажа и пусть  $(P, \delta_B) \in \mathbb{R}^2$  вектор управляющих воздействий, в который входит  $P$  – сила тяги и  $\delta_B$  – угол отклонения руля высоты. То есть при управлении БПЛА в продольной плоскости воздействовать на его перемещение мы можем, изменяя силу тяги и угол отклонения руля высоты.

Уравнения математическая модель продольного движения БПЛА имеют следующую форму [29]:

$$\begin{aligned} \dot{V}_k(t) &= -g \sin \theta + \frac{P}{m} \cos(\varphi + \vartheta - \theta) + \frac{qS}{m} \\ &\quad (c_x \cos(\vartheta - \theta) - c_y \sin(\vartheta - \theta)) - W_k; \\ \dot{\theta}(t) &= -\frac{g}{V_k} \cos \theta + \frac{P}{m V_k} \sin(\varphi + \vartheta - \theta) + \frac{qS}{m V_k} \\ &\quad (c_x \sin(\vartheta - \theta) + c_y \cos(\vartheta - \theta)) - W_\theta; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_z(t) = \frac{q S b_A}{I_z} m_z;$$

$$\dot{x}(t) = V_k \cos \theta \cos \Psi^*;$$

$$\dot{H}(t) = V_k \sin \theta;$$

$$\dot{\vartheta}(t) = \omega_z,$$

где  $\Psi$  – текущее значение путевого угла;  $c_x, c_y$  – коэффициенты аэродинамических сил;  $m$  – масса самолета;  $I_z$  – момент инерции;  $S$  – площадь крыла;  $q$  – скоростной напор;  $b_A$  – средняя аэродинамическая хорда крыла и  $W_k, W_\theta$  – проекции ветровых возмущений.

Дополним модель (1) выражениями для аэродинамических сил  $c_x, c_y$  и момента  $m_z$ :

$$\begin{aligned} c_x &= c_x^0 + c_x^\alpha \alpha + c_x^{\delta_B} \delta_B; \\ c_y &= c_y^0 + c_y^\alpha \alpha + c_y^{\delta_B} \delta_B; \\ m_z &= m_z^\alpha \alpha + \frac{l}{V_k} m_z^{\omega_z} \omega_z + m_z^{\delta_B} \delta_B, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\alpha = \vartheta - \theta. \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) математическая модель продольного движения (2) принимает вид:

$$\begin{aligned} \dot{V}_k(t) &= -g \sin \theta + \frac{P}{m} \cos(\varphi + \vartheta - \theta) + \\ &+ \frac{qS}{m} \left( \left[ c_x^0 + c_x^\alpha (\vartheta - \theta) + c_x^{\delta_B} \delta_B \right] \cos(\vartheta - \theta) - \right. \\ &\left. - \left[ c_y^0 + c_y^\alpha (\vartheta - \theta) + c_y^{\delta_B} \delta_B \right] \sin(\vartheta - \theta) \right) - W_k; \\ \dot{\theta}(t) &= -\frac{g}{V_k} \cos \theta + \frac{P}{m V_k} \sin(\varphi + \vartheta - \theta) + \\ &+ \frac{qS}{m V_k} \left( \left[ c_x^0 + c_x^\alpha (\vartheta - \theta) + c_x^{\delta_B} \delta_B \right] \sin(\vartheta - \theta) + \right. \\ &\left. + \left[ c_y^0 + c_y^\alpha (\vartheta - \theta) + c_y^{\delta_B} \delta_B \right] \cos(\vartheta - \theta) \right) - W_\theta; \\ \dot{\omega}_z(t) &= \frac{qSb_A}{I_z} \left[ m_z^\alpha (\vartheta - \theta) + \frac{l}{V_k} m_z^{\omega_z} \omega_z + m_z^{\delta_B} \delta_B \right]; \\ \dot{x}(t) &= V_k \cos \theta \cos \Psi^*; \\ \dot{H}(t) &= V_k \sin \theta; \\ \dot{\vartheta}(t) &= \omega_z. \end{aligned} \quad (4)$$

В соответствии с процедурой метода АКАР определим технологические инварианты синтезируемой системы. Очевидно, что в качестве первой цели можно рассматривать стабилизацию скорости движения БПЛА  $V_k$ . В качестве второй цели управления потребуем стабилизацию высоты полета  $H$ :

$$\begin{aligned} V_k &= V_k^0; \\ H &= H^0, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $V_k^0$  – требуемое значение курсовой скорости движения БПЛА,  $H^0$  – необходимая высота полета.

На динамику БПЛА значительное влияние оказывают ветровые возмущения. Поэтому необходимо, чтобы синтезируемая система управления БПЛА с замкнутым контуром была инвариантной к действию этих возмущений. В соответствии с процедурой интегральной адаптации на инвариантных многообразиях [30, 31] в пространство состояний системы управления вводятся дополнительные переменные состояния [32]. Для системы управления БПЛА при продольном движении мы можем ввести две дополнительных переменных состояния системы управления  $z_1$  и  $z_2$ . Тогда, в соответствии с процедурой расчета, математическая модель синергетического синтеза запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{V}_k(t) &= -g \sin \theta + \frac{P}{m} \cos(\varphi + \vartheta - \theta) + \\ &+ \frac{qS}{m} \left( \left[ c_x^0 + c_x^\alpha (\vartheta - \theta) + c_x^{\delta_B} \delta_B \right] \cos(\vartheta - \theta) - \right. \\ &\left. - \left[ c_y^0 + c_y^\alpha (\vartheta - \theta) + c_y^{\delta_B} \delta_B \right] \sin(\vartheta - \theta) \right) + z_1; \\ \dot{\theta}(t) &= -\frac{g}{V_k} \cos \theta + \frac{P}{m V_k} \sin(\varphi + \vartheta - \theta) + \\ &+ \frac{qS}{m V_k} \left( \left[ c_x^0 + c_x^\alpha (\vartheta - \theta) + c_x^{\delta_B} \delta_B \right] \sin(\vartheta - \theta) + \right. \\ &\left. + \left[ c_y^0 + c_y^\alpha (\vartheta - \theta) + c_y^{\delta_B} \delta_B \right] \cos(\vartheta - \theta) \right) + z_2; \\ \dot{\omega}_z(t) &= \frac{qSb_A}{I_z} \left[ m_z^\alpha (\vartheta - \theta) + \frac{l}{V_k} m_z^{\omega_z} \omega_z + m_z^{\delta_B} \delta_B \right]; \\ \dot{x}(t) &= V_k \cos \theta \cos \Psi^*; \\ \dot{H}(t) &= V_k \sin \theta; \\ \dot{\vartheta}(t) &= \omega_z; \\ \dot{z}_1(t) &= \eta_1 (V_k^0 - V_k); \\ \dot{z}_2(t) &= \eta_2 (H^0 - H). \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\eta_1, \eta_2$  – постоянные коэффициенты, отражающие динамику внутренних переменных состояния системы управления.

#### B. Процедура синтеза системы управления

Очевидно, что на первом этапе синтеза мы можем обеспечить стабилизацию курсовой скорости БПЛА. Тогда рассмотрим первую совокупность макропеременных:

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= V_k^0 - V_k - z_1; \\ \Psi_2 &= \sin \theta - \varphi_1, \end{aligned} \quad (7)$$

удовлетворяющую решению  $\Psi_i = 0$ ,  $i = 1, 2$  системы основных функциональных уравнений:

$$T_i \dot{\Psi}_i(t) + \Psi_i = 0; \quad i = 1, 2, \quad (8)$$

где  $T_1, T_2$  – это постоянные времени;  $\varphi_1$  – внутреннее управляющее воздействие.

При попадании изображающей точки замкнутой системы в окрестность пересечения инвариантных многообразий  $\Psi_i = 0$ ,  $i = 1, 2$  в системе будут гарантированно выполняться следующие соотношения:

$$\begin{aligned} V_k &= V_k^0 - z_1; \\ \sin \theta &= \varphi_1. \end{aligned} \quad (9)$$

Следовательно, в замкнутой системе осуществляется динамическое сжатие фазового пространства, в результате чего поведение замкнутой системы в окрестности пересечения инвариантных многообразий  $\Psi_i = 0$  будет описываться декомпозированной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_z(t) &= \frac{qSb_A}{I_z} \left( m_z^\alpha (\vartheta - \arcsin \varphi_1) + \frac{l}{V_k^0 - z_1} m_z^{\omega_z} \omega_z + m_z^{\delta_B} \delta_B \right); \\ \dot{x}(t) &= (V_k^0 - z_1) \sqrt{1 - \varphi_1^2} \cos \Psi^*; \\ \dot{H}(t) &= (V_k^0 - z_1) \varphi_1; \\ \dot{\vartheta}(t) &= \omega_z; \\ \dot{z}_1(t) &= \eta_1 z_1; \\ \dot{z}_2(t) &= \eta_2 (H^0 - H).\end{aligned}$$

На втором этапе синтеза мы можем ввести в рассмотрение второй технологический инвариант – стабилизацию высоты полета БПЛА. Тогда для декомпозированной системы (10) рассмотрим следующую макропеременную:

$$\Psi_3 = H^0 - H - z_2, \quad (11)$$

которая должна удовлетворять решению  $\Psi_3 = 0$  функционального уравнения

$$T_3 \dot{\Psi}_3(t) + \Psi_3 = 0. \quad (12)$$

Из совместного решения систем (11) и (12), с учетом декомпозированной модели (10), определяется выражение для внутреннего управляемого воздействия:

$$\varphi_1 = \frac{(H^0 - H)(T_3 \eta_2 - 1) + z_2}{T_3(z_1 - V_k^0)}. \quad (13)$$

### C. Компьютерное моделирование

При моделировании синтезированной замкнутой системы управления БПЛА параметры объекта управления соответствуют значениям:

$$\begin{aligned}m &= 56,3 \text{ кг}, \quad g = 9,81 \text{ м/с}^2, \quad I_z = 31,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad l = 2,707 \text{ м}, \\ S &= 1,05 \text{ м}^2, \quad q = 679 \text{ кг/м}^2, \quad b_A = 0,35 \text{ м}, \quad c_x^0 = -0,0508 \text{ м/с}^2, \\ c_x^\alpha &= 0,002 \text{ м/с}^2, \quad c_x^{\delta_B} = 0,0006 \text{ м/с}^2, \quad c_y^0 = -0,0704 \text{ м/с}^2, \\ c_y^\alpha &= 5,0013 \text{ м/с}^2, \quad c_y^{\delta_B} = 5,0057 \text{ м/с}^2, \quad m_z^\alpha = -0,0051 \text{ м/с}^2, \\ m_z^{\delta_B} &= 0,00591 \text{ м/с}^2, \quad m_z^{\omega_z} = -16,0505 \text{ м/с}^2\end{aligned}$$

а параметры системы управления были заданы в следующем виде:  $T_1 = 1,5$ ,  $T_2 = 1,5$ ,  $T_3 = 0,2$ ,  $\eta_1 = -0,05$ ,  $\eta_2 = -0,005$ , и целевые значения технологических инвариантов:  $H^0 = 200 \text{ м}$ ,  $V_k^0 = 80 \text{ м/с}$ .

Моделирование замкнутой системы было проведено при изменяющихся ветровых возмущениях, действующих на БПЛА. На рис. 1–2 представлены значения проекций силы ветра  $W_k, W_\theta$  для различных значений временных интервалов.

На рис. 3–4 представлены результаты моделирования синтезированной системы управления БПЛА в условиях действия неизмеряемых ветровых возмущений.

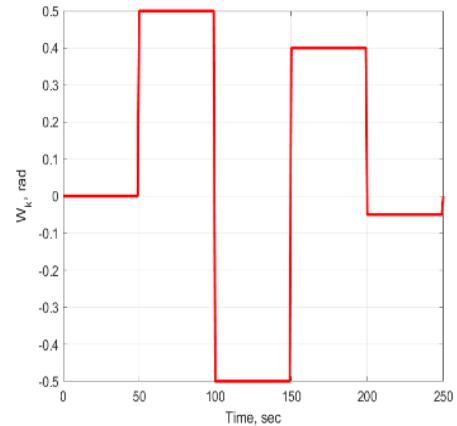


Рис. 1. Изменение проекции силы ветра  $W_k$

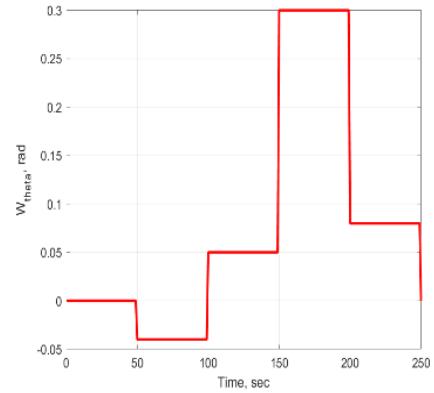


Рис. 2. Изменение проекции силы ветра  $W_\theta$

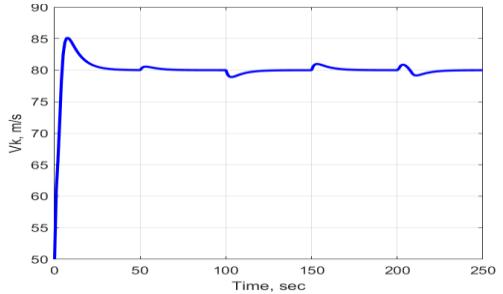


Рис. 3. Переходной процесс относительно курсовой скорости  $V_k$

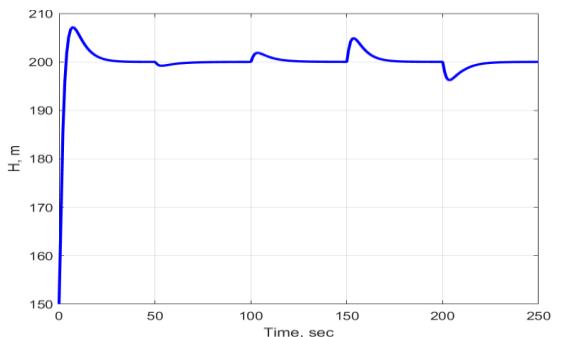


Рис. 4. Переходной процесс относительно высоты полета  $H$

Из представленных результатов моделирования синтезированной замкнутой системы управления БПЛА при продольном движении можно сделать выводы, что в системе обеспечивается выполнение введенных технологических инвариантов, а также обеспечивается асимптотически устойчивое поведение. Синтезированная система управления обеспечивает подавление влияния внешних

неизмеряемых возмущающих воздействий, гарантирует стабилизацию требуемых переменных состояния – курсовой скорости и высоты полета БПЛА.

### III. СИННЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ БОКОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ БПЛА В УСЛОВИЯХ ВЕТРОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

#### A. Математическая модель БПЛА

Перейдем к рассмотрению модели движения БПЛА в боковой плоскости.

Пусть  $(\Psi, \omega_x, \omega_y, z, \gamma, \psi) \in \mathbb{R}^6$  – это будет вектор пространства состояний БПЛА при боковом движении, где  $\Psi$  – угол пути;  $\omega_x = \dot{\gamma}$  – угловая скорость крена;  $\omega_y = \dot{\psi}$  – угловая скорость рыскания;  $z$  – боковое смещение; а  $(\delta_s, \delta_h) \in \mathbb{R}^2$  – вектор управляющих воздействий, в который входят  $\delta_s$  – угол отклонения элерона и  $\delta_h$  – угол отклонения руля направления.

С учетом действия на БПЛА ветровых возмущений и с учетом значений коэффициентов аэродинамических сил и моментов [29] запишем математическую модель в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}(t) &= \frac{P^* \cos \varphi + qS(c_x^0 + c_x^{\delta_s} \delta_s^*)}{mV_k^*} \sin(\psi - \Psi) - \\ &\quad - \frac{P^* \sin \varphi + qS(c_y^0 + c_y^{\delta_s} \delta_s^*)}{mV_k^*} \cos(\psi - \Psi) \gamma + \\ &\quad + \frac{qS(c_z^\beta (\psi - \Psi) + c_z^{\delta_h} \delta_h)}{mV_k^*} (\cos(\psi - \Psi) - \sin(\psi - \Psi) \gamma) - W_{ps}; \\ \dot{\omega}_x(t) &= \frac{qSl}{I_x} \left( m_x^\beta (\psi - \Psi) + \frac{l}{2V_k^*} (m_x^{\omega_x} \omega_x + m_x^{\omega_y} \omega_y) + m_x^{\delta_s} \delta_s + m_x^{\delta_h} \delta_h \right) + \\ &\quad + \frac{I_z - I_y}{I_x} \omega_y^2 \gamma; \\ \dot{\omega}_y(t) &= \frac{qSl}{I_y} \left( m_y^\beta (\psi - \Psi) + \frac{l}{2V_k^*} (m_y^{\omega_x} \omega_x + m_y^{\omega_y} \omega_y) + m_y^{\delta_s} \delta_s + m_y^{\delta_h} \delta_h \right) + \\ &\quad + \frac{I_x - I_z}{I_y} \omega_x \omega_y \gamma; \\ \dot{z}(t) &= -V_k^* \sin \Psi; \\ \dot{\gamma}(t) &= \omega_x; \\ \dot{\psi}(t) &= \omega_y. \end{aligned} \quad (14)$$

где  $W_{ps}$  – проекция ветрового возмущения,  $P^*$  – фиксированное значение силы тяги двигателя БПЛА,  $\delta_s = \delta_s^*$  – угол поворота руля высоты БПЛА при боковом движении остается неизменным,

В соответствии с процедурой интегральной адаптации на инвариантных многообразиях, определим цели управления для БПЛА при боковом перемещении. Так как у БПЛА при боковом движении имеется два канала управления:  $\delta_s$  и  $\delta_h$ , то мы можем определить два инварианта, которые должны будут выполняться в замкнутой системе. Исходя из технологических требований, предъявляемых к движению БПЛА в боковой плоскости, в процессе этого движения необходимо обеспечивать ста-

билизацию угла пути БПЛА  $\Psi$  и угла крена  $\gamma$ . Тогда совокупность технологических инвариантов для БПЛА при боковом движении записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Psi &= \Psi^0; \\ \gamma &= \gamma_0. \end{aligned} \quad (15)$$

В соответствии с процедурой метода интегральной адаптации на инвариантных многообразиях, составим модель синергетического синтеза. В данном случае в рассмотрение вводятся две дополнительные переменные состояния регуляторов  $z_1, z_2$ , которые являются определенной оценкой действия ветровых и других возмущений, оказывающих действие на БПЛА, а также параметрических возмущений модели БПЛА. Тогда расширенная модель синергетического синтеза для БПЛА при боковом движении записывается как:

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}(t) &= \frac{P^* \cos \varphi + qS(c_x^0 + c_x^{\delta_s} \delta_s^*)}{mV_k^*} \sin(\psi - \Psi) - \\ &\quad - \frac{P^* \sin \varphi + qS(c_y^0 + c_y^{\delta_s} \delta_s^*)}{mV_k^*} \cos(\psi - \Psi) \gamma + \\ &\quad + \frac{qS(c_z^\beta (\psi - \Psi) + c_z^{\delta_h} \delta_h)}{mV_k^*} (\cos(\psi - \Psi) - \sin(\psi - \Psi) \gamma) - z_1; \\ \dot{\omega}_x(t) &= \frac{qSl}{I_x} \left( m_x^\beta (\psi - \Psi) + \frac{l}{2V_k^*} (m_x^{\omega_x} \omega_x + m_x^{\omega_y} \omega_y) + m_x^{\delta_s} \delta_s + m_x^{\delta_h} \delta_h \right) + \\ &\quad + \frac{I_z - I_y}{I_x} \omega_y^2 \gamma; \\ \dot{\omega}_y(t) &= \frac{qSl}{I_y} \left( m_y^\beta (\psi - \Psi) + \frac{l}{2V_k^*} (m_y^{\omega_x} \omega_x + m_y^{\omega_y} \omega_y) + m_y^{\delta_s} \delta_s + m_y^{\delta_h} \delta_h \right) + \\ &\quad + \frac{I_x - I_z}{I_y} \omega_x \omega_y \gamma; \\ \dot{z}(t) &= -V_k^* \sin \Psi; \\ \dot{\gamma}(t) &= \omega_x; \\ \dot{\psi}(t) &= \omega_y; \\ \dot{z}_1(t) &= \eta_1 (\Psi^0 - \Psi); \\ \dot{z}_2(t) &= \eta_2 (\gamma_0 - \gamma), \end{aligned} \quad (16)$$

где  $\eta_1, \eta_2$  – постоянные коэффициенты, отражающие динамику переменных состояния  $z_1, z_2$ .

#### B. Процедура синтеза системы управления

На первом этапе синергетического синтеза вводится первый набор макропеременных, учитывающий первый технологический инвариант (15):

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= \Psi^0 - \Psi - z_1; \\ \Psi_2 &= \omega_x - \varphi_1, \end{aligned} \quad (17)$$

при этом совокупность макропеременных (17) должна удовлетворять решению  $\Psi_i = 0$ ,  $i = 1, 2$  системы основных функциональных уравнений:

$$T_1 \dot{\Psi}_i(t) + \Psi_i = 0, \quad i = 1, 2, \quad (18)$$

где  $T_1, T_2$  – постоянные времени;  $\varphi_1$  – внутреннее управляющее воздействие.

В соответствии с принципом расширения-сжатия фазового пространства, при попадании под влиянием синтезируемых управляющих воздействий изображающей точки замкнутой системы в окрестность пересечения инвариантных многообразий  $\Psi_i = 0$ ,  $i = 1, 2$  в системе происходит динамическая декомпозиция. Следовательно, в системе будут гарантированно соблюдаться следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \Psi &= \Psi^0 - z_1; \\ \omega_x &= \varphi_1. \end{aligned} \quad (19)$$

С учетом выражений (19) поведение замкнутой системы в окрестности пересечения инвариантных многообразий  $\Psi_i = 0$ ,  $i = 1, 2$  описывается декомпозированной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_y(t) &= \frac{qS}{I_y} \left( m_y^\beta (\psi - \Psi) + \frac{l}{2V_k^*} (m_y^{\omega_x} \varphi_1 + m_y^{\omega_y} \omega_y) + m_y^{\delta_x} \delta_x + m_y^{\delta_u} \delta_u \right) + \\ &+ \frac{I_x - I_z}{I_y} \varphi_1 \omega_y \gamma; \\ \dot{z}(t) &= -V_k^* \sin(\Psi^0 - z_3); \\ \dot{\gamma}(t) &= \varphi_1; \\ \dot{\psi}(t) &= \omega_y; \\ \dot{z}_1(t) &= \eta_1 z_1; \\ \dot{z}_2(t) &= \eta_2 (\gamma_0 - \gamma), \end{aligned} \quad (20)$$

На втором этапе синтеза для декомпозированной системы (22) вводим макропеременную

$$\Psi_3 = \gamma_0 - \gamma - z_2 \quad (21)$$

которая должна удовлетворять решению  $\Psi_3 = 0$  функционального уравнения

$$T_3 \dot{\Psi}_3(t) + \Psi_3 = 0. \quad (22)$$

Из совместного решения (21) и (22) с учетом декомпозированной модели (20) определяется выражение для внутреннего управления:

$$\varphi_1 = -\frac{(T_3 \eta_2 - 1)(\gamma_0 - \gamma) + z_2}{T_3}. \quad (23)$$

### C. Компьютерное моделирование

При компьютерном моделировании были приняты параметры системы управления боковым движением:

$$\begin{aligned} T_1 = T_2 &= 3, \quad T_3 = 0,1, \quad \eta_1 = \eta_2 = -1, \quad c_z^\beta = 0,013 \text{ м/c}^2, \\ c_z^{\delta_x} &= -3,033 \text{ м/c}^2, \quad m_x^\beta = -0,002 \text{ м/c}^2, \quad m_x^{\omega_x} = -0,38 \text{ м/c}^2, \\ m_x^{\omega_y} &= -0,5013 \text{ м/c}^2, \quad m_x^{\delta_x} = -0,004 \text{ м/c}^2, \quad m_y^{\omega_x} = 0,01 \text{ м/c}^2, \\ m_x^{\delta_u} &= -0,004 \text{ м/c}^2, \quad m_y^\beta = 0,0018 \text{ м/c}^2, \quad m_y^{\delta_u} = -0,009 \text{ м/c}^2, \\ m_y^{\omega_y} &= 0,0921 \text{ м/c}^2, \quad m_y^{\delta_x} = 2,009 \text{ м/c}^2 \end{aligned}$$

значение переменных и управляющих воздействий подсистемы продольного движения:  $V_k^* = 50 \text{ м/с}$ ;  $\theta = 0 \text{ рад}$ ,  $\vartheta = 0 \text{ рад}$ ,  $P^* = 350 \text{ Н}$ ,  $\delta_e^* = 0,5 \text{ рад}$ , и целевые значения технологических инвариантов:  $\Psi^0 = 0,09$ ;  $\gamma_0 = 0$ .

Исследование системы проводим при условии действия на систему внешнего неизмеряемого ветрового возмущения. На рис. 5 представлен график проекции силы ветра в направлении отклонения от угла пути.

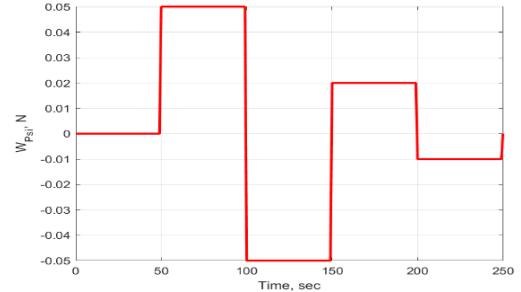


Рис. 5. Изменение проекции силы ветра  $\Psi$

На рис. 6–7 представлены результаты моделирования синтезированной системы управления БПЛА с жестким крылом в условиях действия неизмеряемых ветровых возмущений.

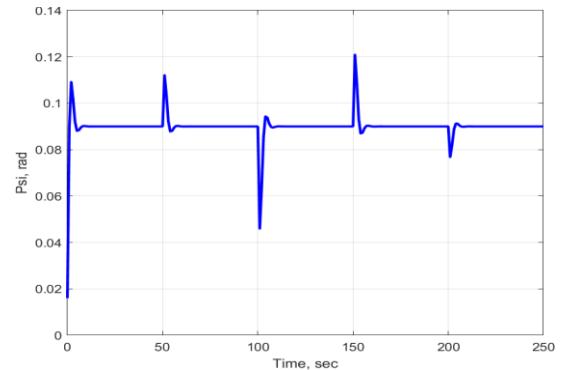


Рис. 6. Переходный процесс относительно угла пути  $\Psi$

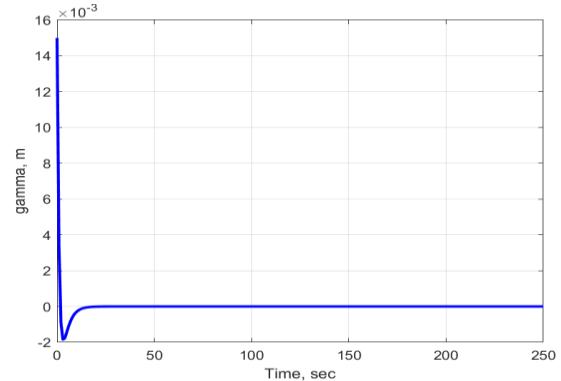


Рис. 7. Переходной процесс относительно угла крена  $\gamma$

Синтезированная система управления обеспечивает подавление влияния внешних неизмеряемых возмущающих воздействий, гарантирует стабилизацию требуемых переменных состояния – курсовой скорости и высоты полета БПЛА.

### IV. СИСТЕМА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ БПЛА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫМ И БОКОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Полученные выше результаты позволяют сделать утверждение, что синтезированные системы управления продольным и боковым движением обеспечивают асим-

прототипически устойчивое поведение БПЛА при движении соответственно в продольной и поперечной плоскостях, а также гарантируют компенсацию влияния внешних неизмеряемых возмущающих воздействий, имеющих кусочно-постоянную форму. Однако в многих работах проводилось исследование при условии, что БПЛА движется исключительно только либо в продольной, либо в поперечной плоскостях. При этом в реальных условиях, в том числе при действии внешних возмущений, это движение может быть совмещено. Поэтому мы проведем исследование поведения БПЛА с синтезированными синергетическими законами управления продольным и боковым движением при их совместном действии.

Структура системы управления пространственным движением БПЛА, состоящей из двух подсистем – подсистемы продольного и подсистемы бокового движения – представлена на рис. 8.

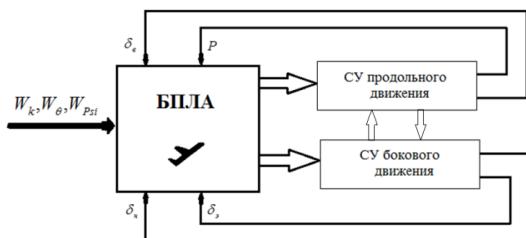


Рис. 8. Структура системы управления пространственным движением БПЛА

При исследовании системы управления пространственным движением БПЛА (рис. 8) предполагаем, что на БПЛА действует ветровое возмущение, проекции которого имеют вид, представленный на рис. 1, 2 и 5.

При моделировании будем использовать математическую модель пространственного движения БПЛА в траекторной системе координат, параметры системы управления продольным и боковым движением. При этом комбинированная система управления учитывает взаимовлияние между подсистемами, то есть при моделировании предполагается, что переменные, значения которых фиксировалось при рассмотрении каждой из подсистем, теперь изменяются в процессе работы всей системы в целом.

Для выполнения процедур моделирования системы управления пространственным движением БПЛА были разработаны схемы в пакете Simulink. Результаты моделирования системы комбинированного управления (с подсистемами продольного и бокового движения) пространственным движением БПЛА в условиях воздействия ветровых возмущений представлены на рис. 9–18.

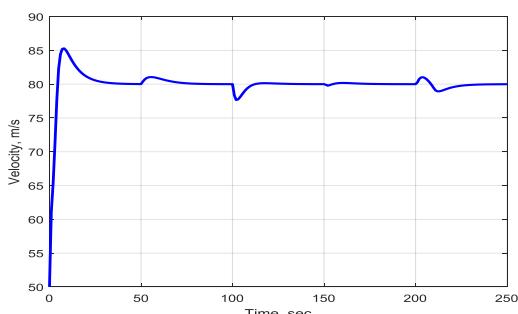


Рис. 9. Переходной процесс относительно линейной скорости  $V_k$

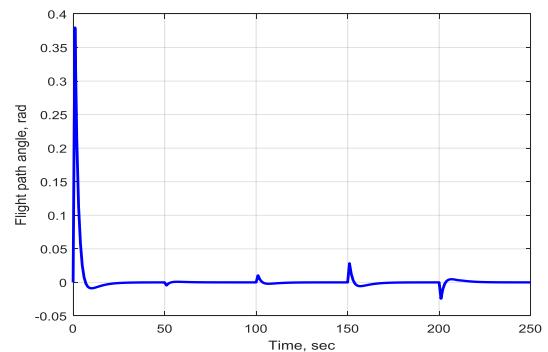


Рис. 10. Переходной процесс относительно угла наклона траектории  $\theta$

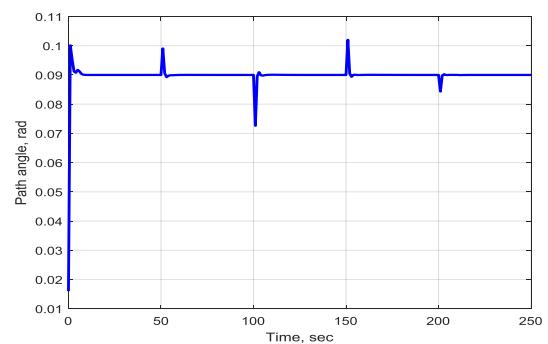


Рис. 11. Переходный процесс относительно угла пути  $\Psi$

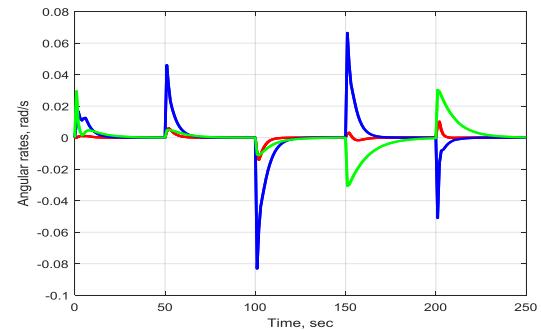


Рис. 12. Переходные процессы относительно проекций угловой скорости

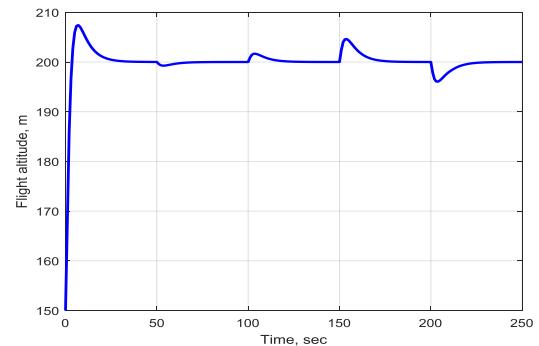


Рис. 13. Переходной процесс относительно высоты полета  $H$

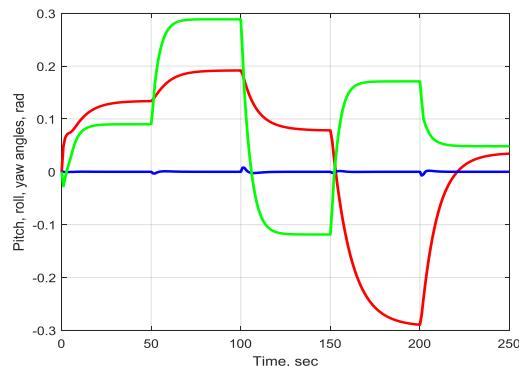


Рис. 14. Переходные процессы относительно углов рысканья, тангенажа и крена

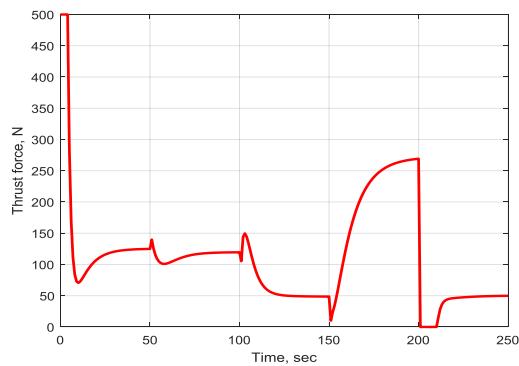


Рис. 15. Изменение силы тяги силовой установки Р

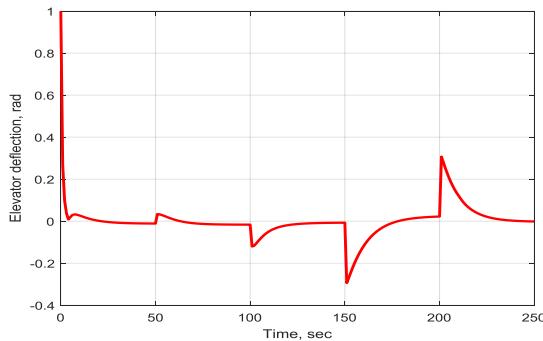


Рис. 16. Изменение угла отклонения руля высоты  $\delta_e$

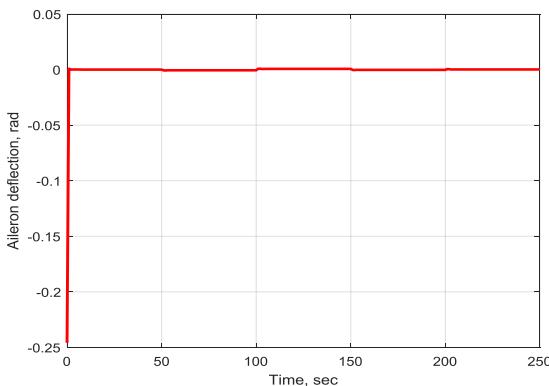


Рис. 17. Изменение угла отклонения элерона  $\delta_a$

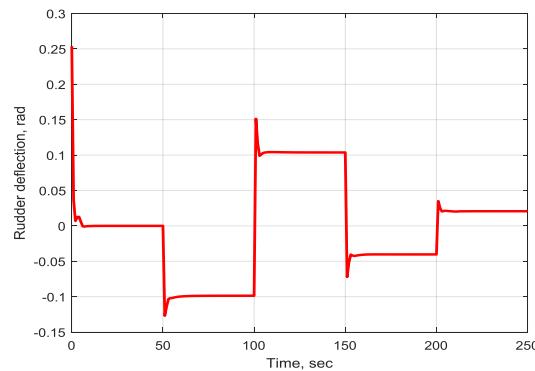


Рис. 18. Изменение угла отклонения руля направления  $\delta_r$

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен новый метод синергетического синтеза законов управления пространственным движением БПЛА с жестким крылом в условиях ветровых возмущений, отличающийся от ранее предложенных [33] использованием раздельных процедур синтеза законов управления продольным и боковым движением БПЛА с жестким крылом.

Из представленных результатов моделирования синтезированной замкнутой системы управления БПЛА при продольном и боковом движении можно сделать выводы, что предложенный метод гарантирует асимптотически устойчивое поведение БПЛА с жестким крылом в окрестности совокупностей целевых инвариантов каждой из подсистем.

## ЛИТЕРАТУРА

- Yang L., Liu Z., Wang X., Xu Y. An optimized image-based visual servo control for fixed-wing unmanned aerial vehicle target tracking with fixed camera // IEEE Access. – 2019. – 7. – P. 68455-68468.
- Mathisen S.G., Leira F.S., Helgesen H.H., Gryte K. and Johansen T.A. Autonomous ballistic airdrop of objects from a small fixed-wing unmanned aerial vehicle // Autonomous Robots. – 2020. – Vol. 44 (5). – P. 859-875.
- Kwak J., Park J.H., Sung Y. Emerging ICT UAV applications and services: Design of surveillance UAVs // International Journal of Communication Systems. – 2021. – 34 (2). – P. e4023.
- Cerro J.D., Cruz Ulloa C., Barrientos A., de León Rivas J. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A survey // Agronomy. – 2021. – 11 (2). – P. 203.
- Corcoran E., Winsen M., Sudholz A., Hamilton G. Automated detection of wildlife using drones: Synthesis, opportunities and constraints // Methods in Ecology and Evolution. – 2021. – No. 12 (6). – P. 1103-1114.
- Ingabire A. and Sklyarov A.A. Fixed-wing UAVs navigation in the presence of wind: a survey // Engineering journal of Don. – 2019, – Vol. 54, No. 3. – P. 1-10.
- Wang B.H., Wang D.B., Ali Z.A., Ting Ting B. and Wang H. An overview of various kinds of wind effects on unmanned aerial vehicle // Measurement and Control. – 2019. – Vol. 52, No. 7-8. – P. 731-739.
- Stastny T. and Siegwart R. “Nonlinear model predictive guidance for fixed-wing UAVs using identified control augmented dynamics // IEEE International Conference on Unmanned Aircraft Systems. – 2018. – P. 432-442.
- Liu C. and Chen W.H. Disturbance rejection flight control for small fixed-wing unmanned aerial vehicles // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2016. – Vol. 39, No. 12. – P. 2810-2819.
- Kumar K.S., Arya H. and Joshi A. Longitudinal Control of Agile Fixed-Wing UAV Using Backstepping // IEEE Aerospace Conference. – 2019. – P. 1-11.
- Kumar K.S., Arya H., Joshi A. Longitudinal Control of Agile Fixed-Wing UAV Using Backstepping // IEEE Aerospace Conference. (Montana, USA). – 2019. – P. 1-11.

12. *Safwat E., Weiguo Z., Kassem M., et al.* Robust Nonlinear Flight Controller for Small Unmanned Aircraft Vehicle based on Incremental BackStepping [Electronic resource] // AIAA Scitech Forum (Orlando, USA). – 2020. – URL: <https://doi.org/10.2514/6.2020-0854>.
13. *Stastny T., Siegwart R.* Nonlinear model predictive guidance for fixed-wing UAVs using identified control augmented dynamics // International Conference on Unmanned Aircraft Systems (Dallas, USA). – 2018. – P. 432-442.
14. *Mathisen S.H., Fossen T.I., Johansen T.A.* Non-linear model predictive control for guidance of a fixed-wing UAV in precision deep stall landing // International Conference on Unmanned Aircraft Systems (Colorado, USA). – 2015. – P. 356-365.
15. *Gunes U., Sel A., Kasnakoglu C., et al.* Output feedback sliding mode control of a fixed-wing UAV under rudder loss [Electronic resource] // AIAA Scitech Forum (San Diego, USA). – 2019. – URL: <https://doi.org/10.2514/6.2019-0911>.
16. *Hervas J.R., Kayacan E., Reyhanoglu M., et al.* Sliding mode control of fixed-wing uavs in windy environments // 13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (Singapore). – 2014. – P. 986-991.
17. *Patrikar J., Makkapati V.R., Pattanaik A., et al.* Nested Saturation Based Guidance Law for Unmanned Aerial Vehicles [Electronic resource] // J. Patrikar, // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 2019. – Vol. 141, No. 7. – URL: <https://doi.org/10.1115/1.4043107> (date of the application: 15.01.2020).
18. *Beard R.W., Ferrin J., Humpherys J.* Fixed wing UAV path following in wind with input constraints // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2014. – Vol. 22, No. 6. – P. 2103-2117.
19. *Gomez J.F., Jamshidi M.* Fuzzy logic control of a fixed-wing unmanned aerial vehicle // 2010 World Automation Congress (Kobe, Japan). – 2010. – P. 1-8.
20. *Apkarian P., Noll D.* Nonsmooth  $H^\infty$  synthesis // IEEE Transactions on Automatic Control. – Vol. 51 (1). – P. 71-86.
21. *Uyulan C., Yavuz M.T.* Robust H-infinity control applied on a fixed wing unmanned aerial vehicle // Advances in aircraft and spacecraft science. – 2019. – Vol. 5, No. 6. – P. 371-389.
22. *Cao S., Shen L., Zhang R., et al.* Adaptive Incremental Nonlinear Dynamic Inversion Control Based on Neural Network for UAV Maneuver // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (Hong Kong, China). – 2019. – P. 642-647.
23. *Lungu M.* Backstepping and dynamic inversion combined controller for auto-landing of fixed wing UAVs // Aerospace Science and Technology. – 2020. – Vol. 96. – P. 105526.
24. *Xi A., Zhao Y.* L1 adaptive control of the flying wing UAV with unknown time-varying disturbances // 11th Asian Control Conference (Australia). – 2017. – P. 543-648.
25. *Колесников А.А.* Новые нелинейные методы управления полетом. – М.: Физматлит, 2013. – 196 с.
26. *Колесников А.А., Кобзев В.А., Негуен Ф.* Синергетический синтез систем управления движением самолетов-амфибий, функционирующих в экстремальных условиях // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 5. – С. 150-155.
27. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
28. *Колесников А.А.* Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганизации и управления // Известия ТРТУ. – 2006. – № 6 (61). – С. 10-38.
29. *Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В.* Динамика самолета. Динамика продольного и бокового движения. – М.: Машиностроение, 1979. – 352 с.
30. *Колесников А.А., Колесников Ал.А., Кузьменко А.А.* Метод АКАР и теория адаптивного управления в задачах синтеза нелинейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18, №9. – С. 579-589.
31. *Колесников А.А.* Метод интегральной адаптации нелинейных систем на инвариантных многообразиях: наихудшие возмущения // Материалы 6-й научной конференции «Управление и информационные технологии» (УИТ-2010). – СПб.: Изд-во «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – С. 22-28.
32. *Veselov G.E., Ingabire A.* Synergetic Synthesis of Control of Longitudinal Flight Dynamics of UAV in the Presence of Wind Disturbances with Input Constraints // 2020 International Conference on Control, Automation and Diagnosis, ICCAD 2020 – Proceedings. DOI: 10.1109/ICCAD49821.2020.9260535.
33. *Веселов Г.Е., Ингабире А.* Метод синергетического синтеза законов управления беспилотными летательными аппаратами при пространственном движении в условиях ветровых возмущений // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 38-45.

# Разработка диагностической модели для подсистем содорегенерационного котлоагрегата

**Ковалёв Дмитрий Александрович**  
Высшая школа технологии и  
энергетики  
Санкт-Петербургский  
государственный университет  
промышленных технологий  
и дизайна  
Санкт-Петербург, Россия  
*d.a.kovalyov@yandex.ru*

**Русинов Леон Абрамович**  
Факультет информационных  
технологий и управления  
Санкт-Петербургский  
государственный технологический  
институт (технический университет)  
Санкт-Петербург, Россия  
*lrusinov@yandex.ru*

**Куркина Виктория Вадимовна**  
Факультет информационных  
технологий и управления  
Санкт-Петербургский  
государственный технологический  
институт (технический университет)  
Санкт-Петербург, Россия  
*victoria.kurkina@gmail.com*

**Аннотация.** Задача выявления и идентификации возможных нештатных ситуаций для содорегенерационного котлоагрегата (СРК) является актуальной, ввиду того, что технологические процессы СРК потенциально опасны. Таким образом, разработка системы диагностики, работающей в реальном времени, даст возможность не только на ранних стадиях выявлять отклонения от нормального характера протекания технологического процесса в СРК, но и определять их причины и выдавать рекомендации для оперативного управления процессом с целью ликвидации этих нарушений. В результате были разработаны диагностические модели подсистем СРК в виде иерархической фреймово-продукционной структуры. Разработанные диагностические модели для подсистемы зеленого и белого щелока протестированы с помощью системы имитационного моделирования.

**Abstract.** The task of detection and identification of possible abnormal situations for the recovery boiler (RB) is relevant, due to the fact that technological processes of RB are potentially dangerous. Thus, the development of diagnostic system, working in real time, will make it possible not only at the early stages to identify deviations from the normal course of the technological process in RB, but also to determine their causes and issue recommendations for operational management of the process in order to eliminate these violations. As a result, diagnostic models of RB subsystems in the form of a hierarchical frame-production structure were developed. The developed diagnostic models for the green and white liquor subsystems were tested using a simulation system.

**Ключевые слова:** содорегенерационный котел, декомпозиция, диагностическая модель, фреймово-продукционная структура, нештатная ситуация.

**Keywords:** recovery boiler, decomposition, diagnostic model, frame-production structure, contingency situation.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Системы диагностики технологических процессов реальных объектов управления (ОУ) получают широкое распространение на различных промышленных предприятиях, т.к. обеспечивают возможность эффективной и безопасной эксплуатации ОУ. Архитектура систем диагностики опирается на диагностические модели (ДМ), которые связывают нарушение с симптомами

[1–3], при этом наиболее часто используются модели на основе данных процесса, в частности экспертные диагностические системы [1–4], которые позволяют в условиях неполной информации о технологическом процессе выполнить описание ситуаций на параметрическом уровне и ранжировать симптомы по их важности.

Содорегенерационный котлоагрегат (СРК) является важным элементом цикла регенерации химикатов сульфат-целлюлозного производства и предназначен для регенерации (восстановления свойств) черного щелока, отработанного в процессе варки целлюлозы [5].

Технологические процессы СРК потенциально опасны, поэтому существует обязательная система защиты персонала и оборудования, не допускающая возможность перехода технологического процесса в аварийную ситуацию. Однако срабатывание системы защиты приводит к длительным простоям оборудования, часто к необходимости его последующего ремонта, что связано с существенными финансовыми потерями.

С учетом вышеприведенного, задача выявления и идентификации возможных нештатных ситуаций для СРК является актуальной [6], однако, большинство разработок систем диагностики СРК предназначалось для работы офф-лайн [7]. В то же время при выявлении нештатных ситуаций на ранних стадиях развивающейся нештатной ситуации, что возможно только при онлайн-вой диагностике, появляется время на коррекцию параметров технологического процесса, что позволяет не допустить дальнейшего ее развития и вернуть процесс в регламентные рамки.

Таким образом, именно разработка системы диагностики, работающей в реальном времени, даст возможность не только на ранних стадиях выявлять отклонения от нормального характера протекания технологического процесса в СРК, но и определять их причины и выдавать рекомендации для оперативного управления процессом с целью ликвидации этих нарушений. Однако, для построения такой системы диагностики необходимо иметь диагностические модели подсистем СРК.

Следует отметить, что существующие математические описания большинства подсистем СРК либо отсутствуют, либо сложны и неудобны для реализации в режиме реального времени, к тому же, как правило, разработаны для нормального течения процесса. СРК также представляет собой сложный ОУ [5, 8], но для него выполнена и успешно применяется декомпозиция на несколько взаимосвязанных подсистем: подачи мазута; подачи щелока и улавливания золы; питательной воды и парообразования; подачи воздуха; дымовых газов; зеленого и белого щелока; обдувки; дренажей и опорожнения [8]. Декомпозиция СРК даёт возможность для каждой из входящих в её состав подсистем разработать соответствующие системы мониторинга и диагностики состояния технологических процессов в этих подсистемах.

Для разработки ДМ подсистем СРК в свете вышесказанного представляется целесообразным использовать экспертные модели, основанные на опыте экспертов, ведущих эти процессы, и на результатах обработки массивов данных, полученных на реальном ОУ.

Для разработки ДМ подсистем СРК была выбрана иерархическая фреймово-продукционная структура представления знаний в модели [2]. В такой структуре нештатные ситуации группируются по какому-либо признаку. Полученные группы представляются корневыми фреймами на верхнем иерархическом уровне, а дочерние фреймы объединяют правила, характеризующие подгруппы нештатных ситуаций, вызываемых различными причинами, но имеющими общие симптомы. Определение причины нештатной ситуации проводится на базе связывающих нарушения с симптомами производственных правил, располагаемых также в дочерних фреймах.

## II. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим разработку ДМ СРК на примере подсистемы зеленого и белого щелока и подсистемы обдувки, опорожнения и подачи воды на охлаждение.

Для разработки экспертных моделей выполнен анализ технологического регламента СРК и проведен экспертный опрос, кроме того, был учтен и зарубежный опыт [7, 9]. В результате были определены диапазоны изменения технологических параметров процесса, попадающие в зону ответственности системы оперативного управления и диагностики. При этом эксплуатационные пределы устанавливались на уровне 10-15% от/до границ номинального диапазона.

Распознавание возникновения группы нештатных ситуаций для технологических параметров процесса и, следовательно, активации соответствующего корневого фрейма, осуществляется по отклонению значения одного (реже, нескольких) из основных параметров от регламентного диапазона. Для детального выявления конкретной причины, вызвавшей ситуацию, требуется оценить состояние дополнительных параметров.

В результате анализа технологического регламента СРК и выполненного экспертного опроса с учётом декомпозиции СРК [8] для подсистемы зеленого и белого щелока выделены нижеприведенные нештатные ситуации S1–S11:

S1 – повышение уровня воды в расширительном баке;

- S2 – понижение уровня воды в расширительном баке;
- S3 – повышение расхода воды для охлаждения леток плава;
- S4 – понижение расхода воды для охлаждения леток плава;
- S5 – повышение уровня зелёного щелока в баке-растворителе плава;
- S6 – понижение уровня зелёного щелока в баке-растворителе плава;
- S7 – повышение общей щелочности зелёного щелока;
- S8 – понижение общей щелочности зелёного щелока;
- S9 – повышение плотности зелёного щелока;
- S10 – понижение плотности зелёного щелока;
- S11 – нарушение работы насосов зелёного щелока;

Приведенные нештатные ситуации входят в состав ДМ технологического процесса СРК (подсистема зеленого и белого щелока) [10].

Было выполнено тестирование ДМ подсистемы зеленого и белого щелока для приведенных нештатных ситуаций. Рассмотрим реализацию и тестирование ДМ на примере двух нештатных ситуаций S3–S4, связанных с изменением расхода воды для охлаждения леток плава. Формализация экспертной информации ситуаций S3–S4 приведена в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Основной параметр	Нарушение	Доп. параметры	Возможные причины	Рекомендации
Изменение расхода воды для охлаждения леток плава				
Расход воды <1,7 л/с	Повышение расхода воды для охлаждения леток плава	Повышение уровня воды в запасном баке > 95%	Увеличение подачи воды из линии подпитки	Уменьшить объем поступающей воды из линии подпитки
		Снижение расхода воды на подпитку <1,5 л/с	Снижение подачи воды из линии подпитки	Увеличить подачу воды из линии подпитки
		Снижение расхода воды на подпитку <1,3 л/с	Значительно снижение подачи воды из линии подпитки	Снизить расход скижаемого черного щелока
Расход воды >4,5 л/с	Понижение расхода воды для охлаждения леток плава	Увеличение расхода воды на подпитку >4,7 л/с	Течь воды в обшивке охлаждения леток плава.	Заглушить аварийную летку, при невозможности и аварийно остановить котел
		Отсутствие подачи воды для охлаждения леток плава	Повреждения в обшивке летки	Аварийно остановить котел

Согласно таблице, показателями нештатной ситуации S3 – повышение расхода воды для охлаждения леток плава будут:

- повышение уровня воды в запасном баке L1501 > 95%;
- снижение расхода воды на подпитку F1517 < 1,5 л/с;
- снижение расхода воды на подпитку F1517 < 1,3 л/с;

С учетом вышесказанного рассматриваемую ситуацию можно записать в виде трех правил:

Если  $F < 1,7 \text{ л/с}$  &  $L > 95\%$ , то Dg1.1.1 , Rc1.1.1

Если  $F < 1,7 \text{ л/с}$  &  $F < 1,5 \text{ л/с}$ , то Dg1.1.2 , Rc1.1.2

Если  $F < 1,7 \text{ л/с}$  &  $F < 1,3 \text{ л/с}$ , то Dg1.1.3 , Rc1.1.3

Перечень причин возникновения нештатных ситуаций (диагнозы Dg) и рекомендаций по их устранению (Rc):

Dg1.1.1 – увеличение подачи воды из линии подпитки;

Dg1.1.2 – снижение подачи воды из линии подпитки;

Dg1.1.3 – снижение подачи воды из линии подпитки;

Rc1.1.1 – уменьшить объем поступающей воды из линии подпитки;

Rc1.1.2 – увеличить подачу воды из линии подпитки;

Rc1.1.3 – снизить расход сжигаемого черного щелока.

Разработанные правила были протестированы с помощью имитационного моделирования с использованием экспертной оболочки КАРРА – РСв.2.4.

Для тестирования предложенного алгоритма распознавания причин нештатных ситуаций подсистемы зеленого и белого щелока и подсистемы обдувки, опорожнения и подачи воды на охлаждение СРК №1 использованы статистические данные работы за период 06.02.2020 по 06.03.2020.

Сработало третье правило ситуации (рис. 1).



Рис. 1. Результат работы экспертной системы при возникновении нештатной ситуации S3

Ввиду того, что на ранних стадиях возникновения и развития нештатных ситуаций в СРК существующая система диагностики работает в информационно-советующем режиме у оператора не всегда есть возможность оперативно реагировать на отклонение параметров, например, одновременно может отображаться несколько информационных сообщений для различных подсистем. Разработанная ДМ позволит достаточно точно распознавать нештатные ситуации на ранних стадиях их возникновения и развития и уменьшить время реакции оператора на ситуацию и принятие решения.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что СРК является важным и, к тому же, потенциально опасным объектом сульфат-целлюлозного производства, обеспечивающим регенерацию черного щелока. В то же время срабатывание обязательных систем противоаварийной защиты приводит к остановам производства, возможным ремонтам и экономическим потерям. Это делает актуальной разработку систем ранней диагностики нештатных ситуаций, в то же время отсутствие математических описаний большинства подсистем СРК затруднило разработку соответствующих необходимых систем диагностики. Выход был найден в использовании для создания ДМ экспертной информации и обработки массивов данных с СРК.

В результате были разработаны ДМ подсистем СРК в виде иерархической фреймово-продукционной структуры. Разработанные ДМ для подсистемы зеленого и белого щелока протестированы с помощью системы имитационного моделирования на базе экспертной оболочки КАРРА – РСв.2.4. Показано, что ДМ распознают причины возникновения нештатных ситуаций и могут быть использованы в системе диагностики для выявления на ранних стадиях их развития возможных нештатных ситуаций, возникающих в СРК, пока они еще обратимы и управляемы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Yin K., Kavuri S.N. A review of process fault detection and diagnosis. Quantitative model-based methods // Computers and Chemical Engineering. – 2003. – Vol. 27. – P. 293-346.
2. Русинов Л.А., Рудакова И.В., Куркина В.В. Мониторинг и диагностика состояния технологических процессов // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2010. – № 7 (33). – С. 80-87. – EDN MSZKRR.
3. Ковалев Д.А., Кондрашкова Г.А., Русинов Л.А. К вопросу применения диагностических моделей для систем автоматического управления объектами целлюлозно-бумажной промышленности // Энергетика, экология и бизнес: Материалы ежегодной III Международной научно-практической конференции обучающихся и преподавателей. В 3-х ч., Санкт-Петербург, 31 мая 2019 года / Под общ. ред. Т.Ю. Коротковой. – СПб.: Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 2019. – С. 86-89. – EDN WODVNM.
4. Русинов Л.А., Куркина В.В. Мониторинг и диагностика состояния потенциально опасных технологических процессов // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. – 2018. – Т. 1. – С. 11-19. – EDN EXOZLP.
5. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. 3. Автоматизация, стандартизация, экономика и охрана окружающей среды в ЦБП. Ч. 1. Автоматизация, стандартизация и экономика в ЦБП. – СПб.: Политехника, 2008. – 621 с. – ISBN: 978-5-7325-0707-2.

6. Singh A., Sharma V., Mittal S. etc. An overview of problems and solutions for components subjected to fireside of boilers // International Journal of Industrial Chemistry. – 2018. – No. 9. – P. 1-15. – DOI: org/10.1007/s40090-017-0133-0.
7. Continuous development of recovery boiler technology – 50 year of cooperation in Finland / Ed. Vakkilainen E., Lampinen P., Nieminen M. // 50th anniversary international recover boiler conference Proceedings. Tampere, 2014, june 11. – 136 p.
8. Ковалев Д.А. Анализ возможных нарушений технологических процессов в содорегенерационном котле // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2021. – № 56. – С. 108-111. – DOI: 10.36807/1998-9849-2020-56-82-108-111. – EDN WYMCWM.
9. Tran H., Villarroel R. Challenges in black liquor recovery in modern kraft pulp mills // The 5th International Conference on Eucalyptus Pulp Porto Seguro, Brazil, 2011, May 12. – 50 p.
10. Kovalev D.A., Rusinov L.A. Increase in environmental safety of recovery boiler // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: IV International scientific and practical conference "Actual problems of the energy complex: mining, production, transmission, processing and environmental protection" (APEC-IV-2021), Tajikistan, 24–26 ноября 2021 года. – Tajikistan: IOP Publishing Ltd, 2022. – P.012068. – DOI: 10.1088/1755-1315/990/1/012068. – EDN AOGERP.

# Синергетический подход к синхронизации хаотических систем Арнеодо: сравнение закона управления с форсированным скользящим режимом и закона с интегральной адаптацией

Кузьменко Андрей Александрович  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[aakuzmenko@sedu.ru](mailto:aakuzmenko@sedu.ru)

**Аннотация.** В работе показано сравнение двух подходов синергетической теории управления к построению робастного закона управления синхронизацией хаотических систем Арнеодо: синтез закона управления с форсированным скользящим режимом (ФСР) и с интегральной адаптацией (ИА). Результаты сравнения говорят о существенно лучшей робастности закона с ИА к действующим параметрическим возмущениям. Критериями эффективности законов управления выступали среднеквадратичное отклонение и среднее абсолютное значение ошибки синхронизации. Основными отличительными особенностями предложенных законов управления являются компенсация параметрических возмущений без синтеза наблюдателей возмущений, возможность исключить chattering эффект, более простой анализ устойчивости замкнутой системы.

**Abstract.** The paper shows a comparison of two approaches of synergetic control theory to the construction of a robust control law for the synchronization of chaotic Arneodo systems: the synthesis of a control law with forced sliding mode (FSM) and with integral adaptation (IA). The results of the comparison indicate a significantly better robustness of the law with IA to the operating parametric perturbations. The criteria for the effectiveness of the control laws were the root-mean-square error and the average absolute value of the synchronization error. The main distinguishing features of the proposed control laws are compensation of parametric disturbances without synthesis of perturbation observers, the ability to exclude the chattering effect, a simpler analysis of the stability of a closed system.

**Ключевые слова;** нелинейное управление, синергетическая теория управления, робастность, интегральная адаптация, форсированный скользящий режим.

**Keywords:** nonlinear control, synergetic control theory, robustness, integral adaptation, forced sliding mode.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Ранее в [1] отмечалось, что «... проблеме нелинейного управления техническими системами посвящены сотни монографий и тысячи статей и докладов. Характерной чертой таких систем является их структурная и параметрическая неопределенность. Наиболее распростра-

ненными методами преодоления подобных неопределенностей являются методы аддитивного и робастного управления». В настоящее время аддитивность и робастность систем управления обеспечиваются преимущественно за счет совместного использования традиционных линейных методов аддитивного и робастного управления, а также методов теории нечетких систем управления и искусственных нейронных сетей, использование скользящих режимов для обеспечения робастности к возмущениям и др. [2–4]. Но совершенно иным направлением нелинейного управления техническими системами является синергетическая теория управления (СТУ) [5, 6], которая нашла широкое применение в различных областях современной техники и включает в себе возможности синтеза, как робастного (в т.ч. с использованием скользящего режима), так и аддитивного управления.

Основные особенности СТУ [5, 6] применительно к проблеме синтеза нелинейных законов управления сложными техническими объектами являются направленная, а не спонтанная самоорганизация системы, использование нелинейных высокоразмерных моделей объекта управления, аналитическая процедура синтеза скалярных и векторных законов управления, аналитическая процедура синтеза робастных и аддитивных законов управления.

В СТУ имеются три способа обеспечения робастности нелинейной системы к внешним и параметрическим возмущениям. Первый способ – это использование принципа интегральной адаптации (ИА) [7–11], который заключается во введении в закон управления нелинейных интеграторов, компенсирующих возмущения без их оперативной оценки. На этапе синтеза закона управления необходима лишь минимальная информация о возмущении – его класс (кусочно-постоянное, полиномиальное, гармоническое и т.д.), который можно представить динамической моделью в виде системы дифференциальных уравнений, и нет необходимости знать его параметры и начальные условия динамической модели. Построение систем управления, опирающихся на принцип ИА, не требует синтеза наблюдателей состояния и возмущений и, соответственно, оперативной оценки этих возмущений. При этом данный способ гарантирует пол-

ную компенсацию полиномиальных возмущений (кускочно-постоянных, линейных и т.д.). А при наличии гармонического возмущения, используя ИА с высоким порядком вводимых интеграторов [11], можно существенно снизить ошибку системы.

Второй способ – построение нелинейных наблюдателей параметрических и/или внешних возмущений [5, 6]. В этом случае синтезируемые нелинейные законы управления дополняются подсистемой наблюдения, осуществляющей динамическую оценку неизмеряемых возмущений и их компенсацию.

Третий способ – построение закона управления, обеспечивающего организацию скользящего режима. Для этого в СТУ имеется два подхода: подход на основе последовательной совокупности инвариантных многообразий [5, 12–14] и подход, позволяющий организовать форсированный скользящий режим (ФСР) [5, 15–18].

Основная цель данной работы – проиллюстрировать сравнение законов робастного управления СТУ в задаче синхронизации двух хаотических систем Арнеодо. Сравниваются закон управления с ФСР и закон, основанный на принципе ИА.

Данная работа продолжает серию работ, в которых выполняется сравнение синергетических законов управления хаотическими системами друг с другом или с другими современными методами робастного и адаптивного управления. Так в [13] выполнено сравнение синергетического закона с ИА и скользящего управления на основе последовательной совокупности инвариантных многообразий, в [17, 18] – синергетического закона скользящего управления с ФСР с адаптивным законом на основе бэк-степпинга, а в [18, 19] – синергетического закона скользящего управления с ФСР с классическим законом скользящего управления.

## II. МЕТОДИКИ СИНТЕЗА

### A. Методика синтеза закона с ФСР

Методика синтеза законов управления с ФСР более детально представлена в [17], а примеры применения – в [15–18]. Ниже кратко изложены основные этапы и соотношения, необходимые для иллюстрации практического примера синтеза робастного закона управления при синхронизации двух хаотических систем Арнеодо.

Пусть исходные дифференциальные уравнения объекта управления имеют вид

$$\begin{aligned}\dot{x}_j(t) &= f_j(x_1, \dots, x_n) + d_{j+1}x_{j+1}, \quad j = \overline{1, n-1}; \\ \dot{x}_n(t) &= f_n(x_1, \dots, x_n) + u,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]^T$  – вектор переменных состояния,  $\dim \mathbf{x} = n \times 1$ ;  $u = u(\mathbf{x})$  – скалярное управление,  $f_i(x_1, \dots, x_n)$ ,  $i = \overline{1, n}$  – непрерывные дифференцируемые функции (в общем случае нелинейные),  $d_{j+1}$  – постоянные параметры системы.

Для системы (1) ставится задача синтеза закона с ФСР: требуется определить такое управление  $u = u(\mathbf{x})$  в функции переменных состояния объекта (1), которое

обеспечивает перевод изображающей точки (ИТ) объекта из произвольного исходного состояния (в некоторой допустимой области) в заданное состояние, определяемое желаемым инвариантом (целью управления), и робастность к параметрическим возмущениям через последовательный переход по ряду поверхностей скольжения.

На  $k$ -м этапе синтеза закона управления с ФСР вводится многообразие вида

$$\psi_k(\mathbf{x}^{(k)}) = \sum_{j=1}^{n_k-1} \beta_{kj} |x_j| + |s_k| = 0 \quad (2)$$

с поверхностью скольжения  $k$ -го уровня

$$s_k = \sum_{j=1}^{n_k-1} \alpha_{kj} x_j + x_{n_k} + u_k(\mathbf{x}_k), \quad (3)$$

где  $\mathbf{x}^{(k)} = [x_1, \dots, x_{n_k}]^T$  – вектор переменных состояния системы на  $k$ -м этапе синтеза;  $n_k$  – размерность системы на  $k$ -м этапе;  $\alpha_{kj}$ ,  $\beta_{kj}$  – параметры;  $u_k(\mathbf{x}_k)$  – неизвестная на данном этапе непрерывная функция, играющая роль «внутреннего» управления для декомпозированной системы следующего,  $(k+1)$ -го, этапа синтеза. Таким образом, из структуры (3) видно, что в общем случае поверхность скольжения задается неявно, т. к. содержит неизвестную функцию  $u_k(\mathbf{x}_k)$ .

На каждом этапе синтеза закона управления рассматривается основное функциональное уравнение метода АКАР [5, 6]:

$$T_k \dot{\psi}_k(t) + \psi_k = 0, \quad (4)$$

где  $\dot{\psi}_k(t) = \sum_{i=1}^{n_k} \frac{\partial \psi_k}{\partial x_i} \dot{x}_i(t)$  – полная производная многообразия (2), определяемая в силу уравнений системы  $k$ -го этапа,  $T_k > 0$  – настроочный параметр закона управления.

Тогда, раскрывая (4) в силу уравнений системы  $k$ -го этапа, многообразия (2) и поверхности скольжения (3), находим выражение соответствующего управления. Это управление переводит ИТ  $k$ -го этапа из некоторого начального состояния на многообразие  $\psi_k = 0$  (2). В связи с тем, что движение относительно  $\psi_k = 0$  (4) асимптотически устойчиво при  $T_k > 0$ , то это означает, что ИТ неизбежно попадает на подмногообразие (3), т.е. на поверхность скольжения.

После  $k$ -го этапа синтеза закона управления декомпозированная система для  $(k+1)$ -го этапа получается путем подстановки в систему  $k$ -го этапа вместо переменной  $x_{n_k}$  выражения, полученного для нее из  $s_k = 0$  (3), и исключения динамического уравнения  $\dot{x}_{n_k}(t)$ , в которое входит управление  $k$ -го этапа синтеза. Отметим, что если на  $k$ -м этапе синтеза закона управления многообразие (2) обеспечивает достижение целевого инварианта, то на этом этапе принимают в (3)  $u_k(\mathbf{x}_k) = 0$ . Иначе, переходят к следующему  $(k+1)$ -му этапу синтеза, на котором

для декомпозированной системы этого этапа осуществляется синтез «внутреннего» управления  $u_k(x_k)$ : как правило, повторяя процедуру предыдущего этапа, либо используя другой метод синтеза (не из СТУ) или задавая выражение управления явным образом.

При необходимости процедуру декомпозиции можно повторять ( $n-1$ ) раз, пока порядок исходной системы (1) не станет равным единице, например, вида

$$\dot{x}_1(t) = f_1(x_1) - d_2 u_q(x_1) \quad (5)$$

или пока не обеспечим желаемый целевой инвариант (или целевые инварианты при векторном синтезе). Полученное выражение управления  $u_q(x_1)$  для системы (5) подставляется в полученное на предыдущем этапе управление  $u_{q-1}(x_1, x_2)$ , которое, в свою очередь, подставляется в  $u_{q-2}(x_1, x_2, x_3)$  и т.д., вплоть до управления  $u_1(x_1, \dots, x_{n-1})$ , непосредственно входящего в искомый закон управления  $u = u(\mathbf{x})$  системы (1). Отметим, что для того чтобы исключить дифференцирование функции  $\text{sign}(\cdot)$ , входящей во «внутренние» управления, рекомендуется ее заменить на одну из эквивалентных непрерывных функций:  $\text{th}(A\cdot)$  или  $(2/\pi)\arctg(A\cdot)$ , где  $A$  – большой коэффициент,  $(\cdot)$  – аргумент функции  $\text{sign}(\cdot)$ .

На каждом этапе синтеза необходимо проверять условие возникновения скользящего режима [20] по неравенству:

$$s_k \cdot \dot{s}_k(t) < 0, \quad (6)$$

или по функции Ляпунова:  $V_k(\mathbf{x}) = 0,5s_k^2$ .

Условия устойчивости замкнутой системы согласно СТУ [5, 6] складываются из условий устойчивости всех введенных функциональных уравнений вида (4) и условий устойчивости финишной декомпозированной системы, размерность которой существенно меньше размерности исходной системы, например вида (5).

#### B. Методика синтеза закона управления с ИА

Методика синтеза законов управления с ИА более детально представлена в [11], а примеры применения – в [7–12]. Ниже кратко изложены основные этапы и соотношения, необходимые для иллюстрации практического примера синтеза робастного закона управления при синхронизации двух хаотических систем Арнеодо.

Согласно идеологии ИА [11] для парирования внешних и параметрических возмущений необходимо каждое из них представить в виде динамической модели, на выходе которой формируется аппроксимированное возмущение соответствующего класса. При этом в структуру этих моделей, согласно принципу ИА, должны входить финишные макропараметры, включающие желаемые инварианты. Так, если рассматривается кусочно-постоянное возмущение, то такой моделью будет урав-

нение вида:  $\dot{z}_i(t) = \Phi_i$ , где  $z_i$  – динамическая переменная модели (оценка) возмущения,  $\Phi_i$  – функция переменных состояния исходного объекта, отражающая желаемый инвариант.

Однако в [11] показано, что использование моделей высокого порядка для компенсации кусочно-постоянного возмущения существенно повышает робастность замкнутой системы, в т. ч. при возникновении шумов и случайных воздействий, выходящих за класс кусочно-постоянного возмущения. Поэтому в этой работе будем использовать ИА высокого порядка для построения робастного закона синхронизации хаотических систем Арнеодо, подверженных параметрическим возмущениям. Рассматриваем модель возмущений вида:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= z_2; \\ \dot{z}_2(t) &= z_3; \\ \dot{z}_3(t) &= \Phi_i. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, для использования ИА для синтеза робастных законов управления необходимо [11]:

- возмущение представить его моделью вида (7). Соответствующая модель возмущения добавляется к уравнениям объекта управления, образуя расширенную систему. В уравнении объекта возмущение заменяется выходной переменной его модели. При этом для параметрических возмущений выходная переменная модели возмущения добавляется аддитивно в соответствующее уравнение динамической модели объекта;
- для расширенной системы осуществляется синтез законов управления в соответствии с базовой процедурой синтеза закона управления в СТУ. Отметим, что в отличие от базовой процедуры при синтезе законов управления в соответствии с ИА финишные макропараметры всегда должны иметь структуру

$$\psi_i = \Phi_i + \sum_{j=1}^s k_j z_j, \quad (8)$$

здесь  $k_j$  – постоянные коэффициенты;  $s$  – количество переменных состояния в модели соответствующего возмущения.

### III. ПРИМЕРЫ СИНТЕЗА

#### A. Модель объекта управления

Рассмотрим модель хаотической системы Арнеодо [21]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2; \\ \dot{x}_2(t) &= x_3; \\ \dot{x}_3(t) &= ax_1 - bx_2 - x_3 - x_1^2. \end{aligned} \quad (9)$$

где  $x_i$  – переменные состояния системы;  $a, b$  – постоянные параметры. В системе Арнеодо (9) возникает хаотическая динамика при номинальных параметрах  $a = 7,5; b = 3,8$ .

В задаче управления синхронизацией хаотических систем математическая модель объекта управления с двумя системами Арнеода включает в себя модель ведущей системы в виде (9) и модель ведомой системы [21]:

$$\begin{aligned}\dot{y}_1(t) &= y_2; \\ \dot{y}_2(t) &= y_3; \\ \dot{y}_3(t) &= ay_1 - by_2 - y_3 - y_1^2 + u,\end{aligned}\quad (10)$$

где  $y_i$  – переменные состояния ведомой системы;  $u$  – управление.

Вводя новые переменные  $e_i(t) = y_i(t) - x_i(t)$ ,  $i = \overline{1,3}$  – ошибки синхронизации, совместную динамику ведущей (9) и ведомой системы (10) представим системой [21]:

$$\begin{aligned}\dot{e}_1(t) &= e_2; \\ \dot{e}_2(t) &= e_3; \\ \dot{e}_3(t) &= ae_1 - be_2 - e_3 - (y_1 + x_1)e_1 + u.\end{aligned}\quad (11)$$

Тогда для системы (11) ставится задача построения закона управления  $u$ , обеспечивающего синхронизацию хаотических систем (9) и (10), т.е. нулевые ошибки синхронизации  $e_i(t) = 0$ ,  $i = \overline{1,3}$ , и робастность к параметрическим возмущениям, действующим на ведущую систему (9). Т. е. полагаем, что в ведомой системе параметры  $a, b$  не изменяются и равны номинальным значениям.

#### B. Синтез закона с ФСР

На первом этапе синтеза управления для системы (11) задаем инвариантное многообразие вида (2):

$$\psi_1 = \beta_1 |e_1| + \beta_2 |e_2| + |s_1| = 0, \quad (12)$$

где  $s_1 = \alpha_{11}e_1 + \alpha_{12}e_2 + e_3 + u_1(e_1, e_2)$ .

Подставляя (12) в функциональное уравнение (4), получаем в силу уравнений объекта (11) закон управления:

$$u = -(\beta_1 e_2 \operatorname{sign} e_1 + \beta_2 e_3 \operatorname{sign} e_2 + \psi_1 / T_1) \operatorname{sign} s_1 - (\alpha_{11} - e_1) e_1 - \left( \alpha_{11} - b + \frac{\partial u_1}{\partial e_1} \right) e_2 - \left( \alpha_{12} - 1 + \frac{\partial u_1}{\partial e_2} \right) e_3. \quad (13)$$

Под действием управления (13) ИТ системы (11) попадает в окрестность многообразия (12), движение вдоль которого в силу  $s_1 = 0$  описывается декомпозированной системой:

$$\begin{aligned}\dot{e}_1(t) &= e_2; \\ \dot{e}_2(t) &= -\alpha_{11}e_1 - \alpha_{12}e_2 - u_1(e_1, e_2).\end{aligned}\quad (14)$$

Для нахождения промежуточного управления  $u_1(e_1, e_2)$  для системы (14) на втором этапе синтеза аналогично зададим многообразие вида (2):

$$\psi_2 = \beta_3 |e_1| + |s_2| = 0, \quad (15)$$

где  $s_2 = \alpha_{21}e_1 + e_2$ .

Подставляя это выражение в функциональное уравнение (4), получаем в силу уравнений декомпозированной системы (14) закон «внутреннего» управления:

$$\begin{aligned}u_1(e_1, e_2) &= (\beta_3 e_2 \operatorname{sign} e_1 + \psi_2 / T_2) \operatorname{sign} s_2 - \\ &- (\alpha_{12} - \alpha_{21}) e_2 - \alpha_{11} e_1.\end{aligned}\quad (16)$$

Таким образом, раскрывая частные производные (16) в (13), получим итоговое выражение для управления. Движение ИТ системы (14) под действием управления (16) будет описываться уравнением:

$$\dot{e}_1(t) = -\alpha_{21} e_1,$$

которое устойчиво при  $\alpha_{21} > 0$ , а выбором значения этого параметра можно обеспечить желаемую динамику переходного процесса. К этим условиям добавим условия устойчивости уравнений (4):  $T_i > 0$ ,  $i = 1, 2$ . Таким образом, условия устойчивости замкнутой системы (11), (13):  $\alpha_{21} > 0$ ,  $T_i > 0$ ,  $i = 1, 2$ .

В [19] были выявлены условия возникновения скользящего режима (6) для первой и второй поверхностей скольжения, которые непосредственно обеспечивается выбором параметров  $\alpha_{12} > 0, \beta_1 > 0, \beta_2 > 0, T_1 > 0$ ,  $\alpha_{21} > 0, \beta_3 > 0, T_2 > 0$ .

#### C. Синтез закона управления с ИА

Рассмотрим синтез робастного закона управления с использованием ИА высокого порядка [11]. Допустим, что ведущая система (9) подвержена параметрическим возмущениям: параметры  $a, b$  изменяются во времени. Тогда влияние этих возмущений представим динамической моделью в виде последовательно включённых трёх интеграторов:

$$\begin{aligned}\dot{z}_1(t) &= z_2; & \dot{z}_2(t) &= z_3; \\ \dot{z}_3(t) &= \gamma_1 e_1 + \gamma_2 e_2 + e_3,\end{aligned}\quad (17)$$

где  $z_1$  – выходная переменная состояния системы (17), которая является динамической оценкой параметрических возмущений в системе (11),  $\gamma_1, \gamma_2$  – постоянные коэффициенты.

В третье уравнение системы (11) добавим аддитивно выходную переменную системы (17). С учетом этого, объединяя (11) и (17), получим расширенную систему для синтеза робастного закона управления:

$$\begin{aligned}\dot{e}_1(t) &= e_2; & \dot{e}_2(t) &= e_3; \\ \dot{e}_3(t) &= ae_1 - be_2 - e_3 - (y_1 + x_1)e_1 + z_1 + u; \\ \dot{z}_1(t) &= z_2; & \dot{z}_2(t) &= z_3; \\ \dot{z}_3(t) &= \gamma_1 e_1 + \gamma_2 e_2 + e_3.\end{aligned}\quad (18)$$

В соответствии принципом ИА введём следующую макропеременную (с учетом (8)):

$$\psi_3 = \gamma_1 e_1 + \gamma_2 e_2 + e_3 + k_1 z_1 + k_2 z_2 + k_3 z_3. \quad (19)$$

Здесь в (19) целевой инвариант (в нашем случае это нулевые значения ошибок синхронизации) представлен выражением  $\Phi = \gamma_1 e_1 + \gamma_2 e_2 + e_3$ .

Подставляя (19) в основное функциональное уравнение СТУ вида (4) и решая его совместно с (18) и (19), находим робастный закон управления:

$$u = -\gamma_1 e_2 - \gamma_2 e_3 - ae_1 + be_2 + e_3 + (y_1 + x_1)e_1 - z_1 - k_1 z_2 - k_2 z_3 - k_3 \gamma_1 e_1 - k_3 \gamma_2 e_2 - k_3 e_3 - \frac{1}{T_3} \psi_3. \quad (20)$$

На многообразии  $\psi_3 = 0$  динамика системы (18) описывается следующей линейной декомпозированной системой:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1(t) &= e_2; \\ \dot{e}_2(t) &= -\gamma_1 e_1 - \gamma_2 e_3 - k_1 z_1 - k_2 z_2 - k_3 z_3; \\ \dot{z}_1(t) &= z_2; \quad \dot{z}_2(t) = z_3; \\ \dot{z}_3(t) &= -k_1 z_1 - k_2 z_2 - k_3 z_3. \end{aligned} \quad (21)$$

Условием устойчивости движения к многообразию  $\psi_3 = 0$  является  $T_3 > 0$ . А для обеспечения устойчивости замкнутой системы (11) с законом управления (20), согласно СТУ необходимо также еще обеспечить устойчивость финишной декомпозированной системы (21), а т. к. она линейна, то сделать это достаточно просто.

Для нахождения неизвестных коэффициентов  $\gamma_1, \gamma_2, k_j$ , обеспечивающих устойчивость системы (21), воспользуемся методом модального управления. Запишем матрицу состояния системы (21) и найдём ее характеристическое уравнение:

$$A(p) = \det(pE - A) = p^5 + (\gamma_2 + k_3)p^4 + (\gamma_1 + \gamma_2 k_3 + k_2)p^3 + (k_3 \gamma_1 + k_2 \gamma_2 + k_1)p^2 + (k_2 \gamma_1 + k_1 \gamma_2)p + k_1 \gamma_1 = 0.$$

Зададим желаемое характеристическое уравнение с заданным расположением корней:

$$A_0(p) = (p - p_0)^5 = p^5 - 5p_0 p^4 + 10p_0^2 p^3 - 10p_0^3 p^2 + 5p_0^4 p - p_0^5 = 0,$$

здесь  $p_0 < 0$  – желаемый корень.

Приравнивая коэффициенты этих двух уравнений при одинаковых степенях  $p$ , и найдём эти искомые значение:  $\gamma_1 = p_0^2$ ,  $\gamma_2 = -2p_0$ ,  $k_1 = -p_0^3$ ,  $k_2 = 3p_0^2$ ,  $k_3 = -3p_0$ .

#### IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При моделировании замкнутой системы полагаем, что параметры  $a, b$ , входящие в законы управления (13), (20) и ведомую систему (10), неизменны и равны номинальным  $a_0 = 7,5$ ;  $b_0 = 3,8$ . А параметры ведущей системы (9) изменяются следующим образом:

$$a = \begin{cases} a_0, & t < 20; \\ 1,5a_0, & t \geq 20; \end{cases} \quad b = \begin{cases} b_0, & t < 20; \\ 1,5b_0, & t \geq 20. \end{cases} \quad (22)$$

Моделирование замкнутой системы производилось в Matlab R2021a с начальными условиями:  $x_1(0) = 3$ ;  $x_2(0) = 2$ ;  $x_3(0) = 2$ ;  $y_1(0) = 1$ ;  $y_2(0) = -1$ ;  $y_3(0) = 7$ . Па-

раметры закона (13):  $T_1 = T_2 = 0,1$ ;  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 1$ ;  $\alpha_{11} = 3,8$ ;  $\alpha_{12} = 1$ ;  $\alpha_{21} = 40$ ;  $A = 20$ ; параметры закона (20):  $p_0 = -20$ ;  $T_3 = 0,1$ .

На рис. 1–4 показаны результаты моделирования системы (11) при наличии параметрических возмущений (22) на интервале  $t \in [15; 50]$ : с законом управления (13) пунктирующая линия красного цвета, с законом управления (20) – сплошная линия черного цвета. Параметры законов подобраны так, чтобы замкнутая система имела достаточно близкие динамические характеристики переходных процессов и амплитуды управлений.

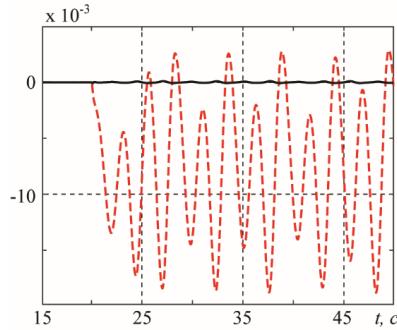


Рис. 1. Графики изменения  $e_1(t)$

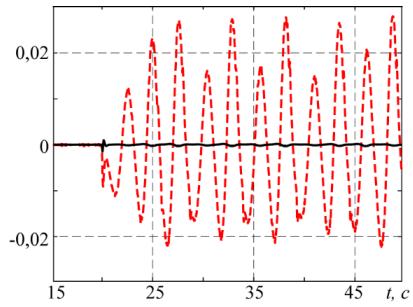


Рис. 2. Графики изменения  $e_2(t)$

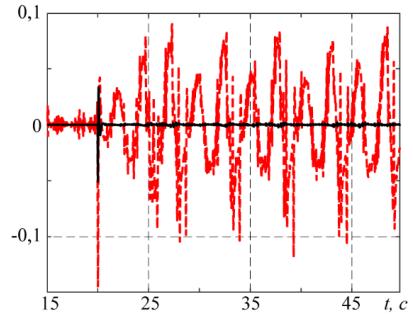


Рис. 3. Графики изменения  $e_3(t)$

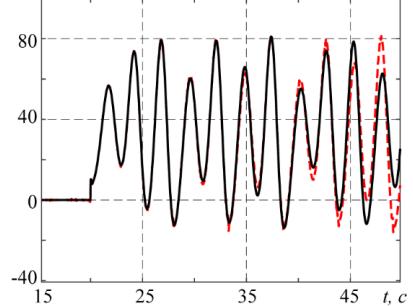


Рис. 4. Графики изменения управлений

Для сравнения законов управления будем ориентироваться на следующие два количественных показателя эффективности [18], вычисляемых по каждой ошибки синхронизации в отдельности:

- среднеквадратичная ошибка (root-mean-square error (RMSE)):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}, \quad (23)$$

- средняя абсолютная ошибка (average absolute value (AVG)):

$$AVG = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|. \quad (24)$$

Результаты вычислений по (23) и (24) представлены в табл. 1. Из представленных результатов моделирования и табл. 1 видно, что закон управления (20) в сравнении с законом с ФСР (13), при схожем быстродействии и амплитуде управления, обеспечивает более точную синхронизацию при параметрических возмущениях (22), что наглядно видно из качественного сравнения рис. 1–3 и количественного сравнения значений показателей (23), (24) в табл. 1.

Кроме того, были проведены некоторые новые ситуации моделирования замкнутых систем, и их результаты продемонстрировали следующее:

- в законах управления (13), (20) величины  $T_k$  являются варьируемыми параметрами этих законов. Увеличение значения  $T_k$  замедляет переходные процессы, а также немножко уменьшает амплитуду сигнала управления и при использовании закона (13) еще более значительно увеличиваются ошибки синхронизации. Соответственно, уменьшение  $T_k$  ускоряет переходные процессы, немножко увеличивает амплитуду сигнала управления и значительно уменьшает ошибки синхронизации при использовании закона (13);

ТАБЛИЦА 1. ЗНАЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Ошибка	Закон с ФСР (13)		Закон с ИА (20)	
	RMSE	AVG	RMSE	AVG
$e_1$ при $t < 20$	1,17e-4	3,69e-5	4,61e-6	4e-7
$e_1$ при $t \geq 20$	97e-4	78e-4	4,51e-5	3,86e-5
$e_2$ при $t < 20$	6,38e-4	1,52e-4	5,06e-5	5,52e-6
$e_2$ при $t \geq 20$	140e-4	120e-4	1,74e-4	1,13e-4
$e_3$ при $t < 20$	79e-4	34e-4	3,64e-4	7,74e-5
$e_3$ при $t \geq 20$	390e-4	330e-4	42e-4	9,41e-4

- получаем аналогичные результаты моделирования (рис. 1–4 и табл. 1), если возмущения (22) влияют не на ведущую систему (9), а на ведомую систему (10).

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено сравнение закона управления с ФСР с синергетическим законом, синтезированным в соответствии с принципом ИА, в задаче обеспечения робастности при синхронизации двух хаотических систем Арнеода в условиях действия параметрических возмущений. Поставленная в работе цель достигнута, а качественные и количественные результаты сравнения рассмотренных законов управления продемонстрированы.

Обобщая полученные результаты, необходимо отметить следующие общие преимущества предложенных законов:

- компенсация параметрических возмущений без синтеза наблюдателей возмущений;
- возможность исключить chattering эффект без потери свойства робастности;
- более простой анализ устойчивости замкнутой системы, т.к. анализ сводится к анализу устойчивости финишной декомпозированной системы, как правило, существенно меньшей размерности или даже линейной, и анализу устойчивости функциональных уравнений (4). В методах вне СТУ анализируется устойчивость замкнутой системы исходной размерности.

Представленный в работе подход позволит по-новому подойти к синтезу робастных законов управления хаотическими системами с учетом идей направленной самоорганизации и робастного управления.

В части развития данной работы будет продолжено сравнение полученных результатов с другими методами современной теории управления и применение данного подхода к другим хаотическим системам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьменко А.А. Интегральная адаптация высокого порядка в задачах синтеза нелинейных систем управления // Информатика и системы управления. – 2018. – № 1 (55). – С. 142-153.
2. Åström K.J. Theory and applications of adaptive control – A survey // Automatica. – 1983. – Vol. 19, Iss. 5. – P. 471-486.
3. Veselý, V. Robust control methods a systematic survey // Journal of Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 64, Iss. 1. – P. 59-64.
4. Mohammadi F. et al. Robust Control Strategies for Microgrids: A Review // IEEE Systems Journal. – 2022. – Vol. 16, iss. 2. – P. 2401-2412.
5. Колесников, А.А. Синергетическая теория управления. – Таганрог: Изд-во ТРГУ; М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с. – ISBN 5-230-24678-2.
6. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – Изд. стереотип. – М.: URSS. 2019. – 240 с. – ISBN 978-5-397-06702-7.
7. Кузьменко А.А., Синицын А.С. Использование принципа интегральной адаптации для повышения устойчивости системы возбуждения синхронного генератора // Технологии техносферной безопасности. – 2013. – № 3 (49). – С. 1-8.
8. Кузьменко А.А., Синицын А.С., Колесниченко Д.А. Принцип интегральной адаптации в задаче адаптивного управления системой "тидрогенератор – синхронный генератор" // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – № 2-1(56). – С. 146-150.
9. Кузьменко А.А. Нелинейный синтез закона адаптивного управления частотой вращения гидротурбины: интегральная адаптация // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 1-2. – С. 85-94.
10. Kuz'menko A.A., Sinitsyn A.S., Mushenko A.S. The use of integral adaptation principle to increase the reliability of "DFIG-Wind turbine" power system // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017: proceedings, Kazakhstan, Astana, 29–30 June 2017.
11. Кузьменко А.А. Интегральная адаптация высокого порядка в задачах синтеза нелинейных систем управления // Информатика и системы управления. – 2018. – № 1 (55). – С. 142-153.
12. Кузьменко А.А. Нелинейное робастное управление возбуждением синхронного генератора: синергетическая система с переменной структурой // Информатика и системы управления. – 2014. – Т. 3, № 41. – С. 130-139.

13. Кузьменко А.А. Сравнение методов робастного управления нелинейными системами: интегральная адаптация и скользящее управление // Системный синтез и прикладная синергетика : сборник научных работ IX Всероссийской научной конференции, пос. Нижний Архыз, 24–27 сентября 2019 года. – Ростов-на-Дону ; Таганрог: ЮФУ, 2019. – С. 51-61.
14. Колесников А.А., Кузьменко А.А. Синтез законов разрывного управления на основе последовательной совокупности инвариантных многообразий метода АКАР // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2019. – Т. 20, №8. – С. 451-460.
15. Кузьменко А.А. Использование форсированного скользящего режима для управления синхронным двигателем с постоянными магнитами // Математическая теория управления и ее приложения: Материалы конференции, г. Санкт-Петербург, 7–8 октября 2020 г. – Санкт-Петербург: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. – С. 176-181.
16. Kuz'menko A.A. Forced sliding mode control: Synergetic approach // IEEE 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA 2020): proceedings ; Russia, Lipetsk, 11 – 13 Nov. 2020.
17. Кузьменко А.А. Использование управления с форсированным скользящим режимом для синхронизации хаотических систем // Информатика и системы управления. – 2021. – № 1 (67). – С. 101-113.
18. Kuz'menko A.A. Forced sliding mode control for chaotic systems synchronization // Nonlinear Dynamics. – 2022. – DOI: 10.1007/s11071-022-07552-x (в печати).
19. Кузьменко А.А. Синхронизация хаотических систем Арнеодо: сравнение синергетического закона скользящего управления с классическим // Системный синтез и прикладная синергетика: сборник научных работ X Всероссийской научной конференции, пос. Нижний Архыз, 28 сентября – 02 октября 2021 года. – Ростов-на-Дону; Таганрог: ЮФУ, 2021. – С. 35-41.
20. Utkin V., Guldner J., Shi J. Sliding Mode Control in Electromechanical Systems. – 2nd ed. – Boca Raton; London; New York: CRC Press, Taylor and Francis, 2009. – 503 p. – ISBN 978-1-4200-6560-2.
21. Sundarapandian V. Adaptive backstepping controller and synchronizer design for Arneodo chaotic system with unknown parameters // International Journal of Computer Science & Information Technology. – 2012. – Vol. 4, No. 6. – P. 143-157.

# Синергетическое управление энергосистемой электромобиля

Олейников Константин Анатольевич

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*koleynikov@sedu.ru*

**Аннотация.** В статье продемонстрирована методика синтеза частотного управления асинхронным электродвигателем с использованием стенда управлением двигателями Texas Instruments и микроконтроллером STM. Дано описание общей схемы функционирования системы, результаты моделирования в системе Matlab и последующая экспериментальная интеграция полученной системы исполняемый С-код на микроконтроллере стенда управления двигателем. Полученные результаты показали эффективность применяемой схемы и перспективности применения подхода модельно-ориентированного проектирования к созданию качественных систем управления.

**Abstract.** This paper demonstrates a technique for synthesizing frequency control of an asynchronous electric motor using a Texas Instruments motor control stand and an STM microcontroller. The description of the general scheme of the system operation, the results of simulation in the Matlab system and the subsequent experimental integration of the resulting system, executed by the C-code on the microcontroller of the engine control stand, are given. Obtaining the results of a study of the effectiveness of the application of the scheme and the prospects for the use of a model-based study of the study of control systems

**Ключевые слова;** электродвигатель, асинхронный электропривод, система управления, микроконтроллер, модельно-ориентированное проектирование.

**Keywords:** *electric motor, asynchronous electric drive, control system, microcontroller, model-based design*

## I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день происходит глобальное удешевление всего производства, а также ужесточаются требования к качеству производимых систем управления, обеспечивающих нужную точность, скорость и энергоэффективность, поэтому все больше внедряются методики проектирования систем с использованием компьютерного моделирования, основанным на модельно-ориентированном проектировании (МОП). Сам подход объединяет структуру взаимодействия между различными модулями в процессе проектирования, жизненного цикла продукта, реализуя тем самым V-образный цикл разработки. Можно выделить следующие этапы в разработке [1]:

- Построение математической модели реализуемого объекта управления;
- Анализ показателей, параметров системы, построение на их основе регулятора;
- Моделирование системы управления;
- Реализация системы управления на объекте управления.

Есть успешные примеры реализации МОП системы в современном производстве. Так ранее рассмотренная компания Tesla, без особого опыта в автомобилестроении, смогла полностью пройти весь цикл от проектирования и моделирования электромобиля Tesla Model S до массового производства за 5 с небольшим лет, при этом стать одним из основных лидеров рынка.

Среди преимуществ модельно ориентированного проектирования можно выделить:

- Наличие единой среды разработки, упрощающие отладку и взаимодействие между группами разработчиков, занимающихся различными задачами;
- Возможность обнаружить определенные ошибки в системе управления уже на этапе проектирования и моделирования, тем самым серьезно сэкономив финансовые средства и время на этапе натурных испытаний;
- Упрощенная возможность постоянного совершенствования системы, параметров и создания производных систем с дополнительным функционалом из-за наличия единой среды и модульности системы.

Электродвигатель является важной частью системы любого электропривода, а использование асинхронного типа может обеспечить нужные качества системы по точности, энергоэффективности и дешевизне производства с последующей реализацией на микроконтроллере [2].

## II. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Среди методов управления асинхронным электродвигателем наиболее часто используется частотное управление. Скалярное управление асинхронными электродвигателями с помощью специальных устройств – частотных преобразователей является наиболее распространенным

классом устройств для поддержания заданной скорости вращения электродвигателя в необходимом значении. На основании формулы вычисления скорости вращения ротора асинхронного двигателя  $\omega_r = \frac{60 \cdot f}{p}$  и схемы скалярного управления, показанной на рис.1 была синтезирована система управления частотным преобразователем в среде Matlab Simulink, представленной на рис. 2 [3].

Система разработанного частотного преобразователя состоит из следующих модулей:

- Блок задающего воздействия по частоте напряжения или скорости вращения электродвигателя;
- Блок генерации синусидального ШИМ-сигнала;
- DC-DC преобразователь для получения напряжения необходимой величины на источнике питания электродвигателя и других бортовых устройств;
- Блока трехфазного инвертора;
- Блока асинхронного электродвигателя;

Параметры асинхронного двигателя были выбраны из пакета SimScape Electrical на основе параметров наиболее близких к двигателю 0.5 кВт.

На основании используемой в скалярном управлении подачи соотношения В/Гц в качестве управляющего сигнала формируется необходимый ШИМ-сигнал для замыкания и отмыкания IGBT транзисторов в трехфазном инверторе, длительность и частота периодов которых будет зависеть от амплитуды/частоты подаваемой синусоиды на сигнал. Чем больше данное соотношение, тем больше транзисторы будут в открытом состоянии, а следовательно, тем больше будет величины напряжения на подключенных фазах – обмотках трехфазного электродвигателя и как следствие будет больше частота вращения двигателя [4].

На рис. 3, 4 показаны графики скорости вращения и электромагнитного момента при 25 Гц и 50 Гц соответственно частоты регулирования при нулевой нагрузке.

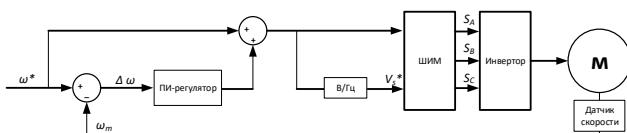


Рис. 1. Структура схемы скалярного управления

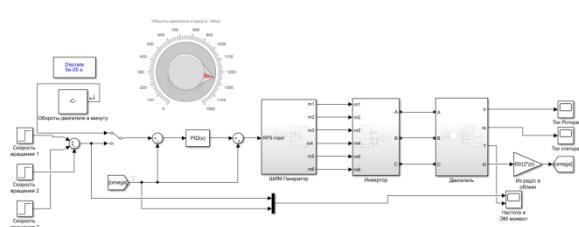


Рис. 2. Система скалярного управления двигателем электромобиля

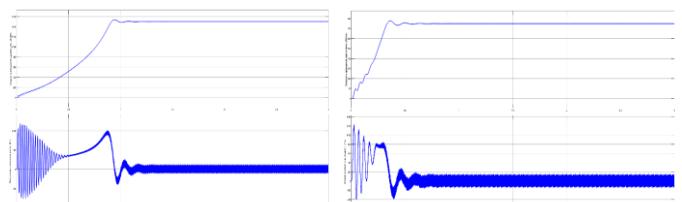


Рис. 3. График скорости вращения электродвигателя и электромагнитного момента при  $f = 50\text{ Гц}$

Рис. 4. График скорости вращения электродвигателя и электромагнитного момента при  $f = 25\text{ Гц}$

Однако наиболее интересен процесс, когда в качестве задающего значения устанавливается скорость вращения электродвигателя. На рис. 5, 6. показаны графики скорости вращения электродвигателя без регулятора и с синтезированным ПИД регулятором при различных вариантах скорости и нагрузки.

Из результатов видно, что ПИД-регулятор лишь способен немного сгладить переходные процессы, однако сама поставленная задача выполняется хоть и с небольшой статической ошибкой. Результаты моделирования остальных компонентов системы с ПИД-регулятором показаны на рис. 7-12.

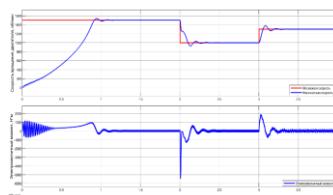


Рис. 5. График системы по скорости вращения двигателя и электромагнитного момента без регулятора

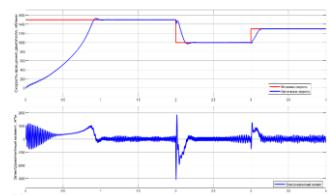


Рис. 6. График системы по скорости вращения двигателя и электромагнитного момента с ПИД-регулятором

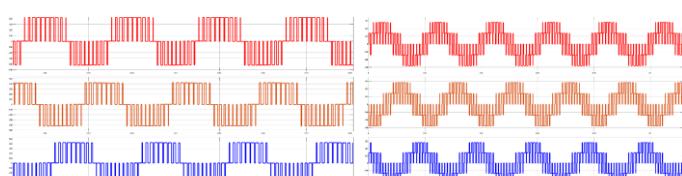


Рис. 7. Амплитудное напряжение, фаза-фаза

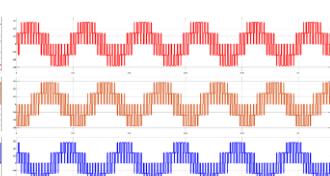


Рис. 8. Амплитудное напряжение, фаза-земля

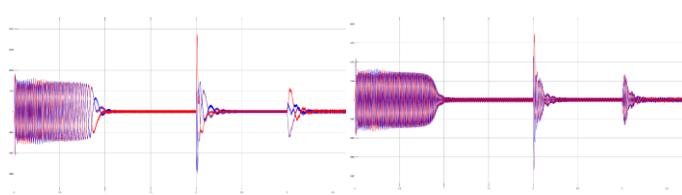


Рис. 9. Ток ротора

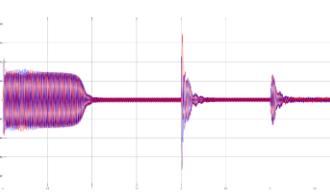


Рис. 10. Ток статора

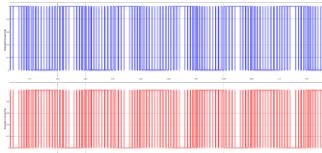


Рис. 11. График ШИМ открытия-закрытия транзисторов одного полумоста

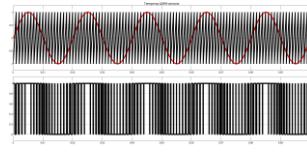


Рис. 12. График генерации синусоидального ШИМ сигнала, работы компараторов и результирующего ШИМ

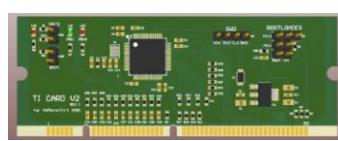


Рис. 14. Силовая часть контроллера STM32F405 – рендер



Рис. 15. Силовая часть контроллера STM32F405 – рендер

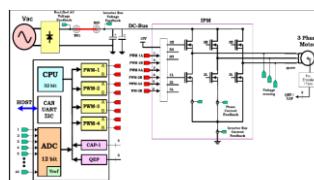


Рис. 16. Принципиальная схема подключения

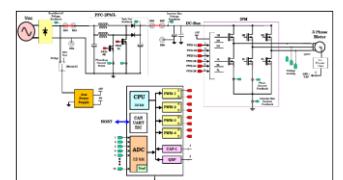


Рис. 17. Полная принципиальная схема всего блока ТI

### III. МИКРОКОНТРОЛЛЕРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Для проведения эксперимента по микроконтроллерной системе управления двигателями переменного тока был собран макет как на рис. 13, состоящий из: стенда TMDSHVMTRPFCKIT от Texas Instruments, асинхронный двигатель с нагрузкой от фирмы Marathon electric, а также отладочная плата с микроконтроллером STM32F405 [5, 6].



Рис. 13. Измерительно-аппаратный стенд управления двигателем Texas Instruments с микроконтроллером

Параметры двигателя, используемого в качестве эксперимента, были следующие:

- артикул модели: 5K33GN2A Matarathon Electric;
- частота вращения номинальная 1450 об/мин;
- номинальное напряжение: 208-230 В;
- мощность: 460 Вт;
- номинальный момент: 1.4 Н·м;
- номинальный фазный ток: 1.6 А;
- номинальная частота сети: 60 Гц;
- количество фаз двигателя: 3;
- тип тока: переменный (AC);
- страна происхождения: Мексика

Изначально в стенде использовался микроконтроллер C2000 компании TSM, однако поскольку его система команд и связь с системой Matlab Simulink является закрытой, то была произведена замена на контроллер семейства STM32 с процессором Cortex M4, с которым у Matlab есть синхронизация через пакет Embedded Coder, способного генерировать выходной С код, его моделирование силовой части в Altium Designer и схема представлена на рис. 14, уже готовая плата с разводкой показана на рис. 16 [7].

Принципиальная схема подключения стенда с контроллером к двигателю показана на рис. 16 и всего блока ТI на рис. 17, в котором используется источник переменного напряжения, выпрямитель, PFC фильтр, 6 управляемых IGBT транзисторов, двигатель, нагрузка [4, 5].

Для микроконтроллера использовались порты датчика Холла, ШИМ линии, блоки АЦП, показанные на рис. 18 красным стрелками. Для связи с Matlab использовались порты UART.

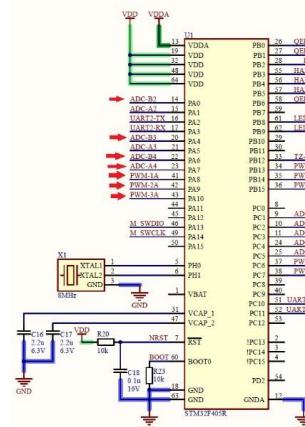


Рис. 18. Схема подключения и используемых портов микроконтроллера

Для программной части управления двигателем была построена схема в Matlab\Simulink, показанная на рис. 19. Данная схема генерирует ШИМ-сигнал, с помощью которого управляется двигатель переменного тока в соответствии со всеми принципами моделирования. Циферблат служит для управления скоростью вращения двигателем. В схеме были реализованы частотное управление и амплитудно-частотное управление с применением стенда Texas и микроконтроллера STM32F405.

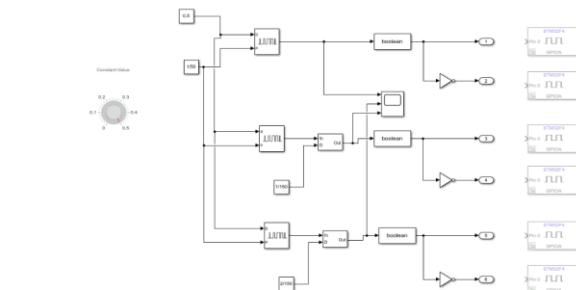


Рис. 19. Блок управления транзисторами

Результаты по разгону скорости вращения двигателя до номинальной и график 3х фазного аппаратного ШИМ-Ма показаны на рис. 20, 21, что показывать стабильность работы и достижения нужных показателей.

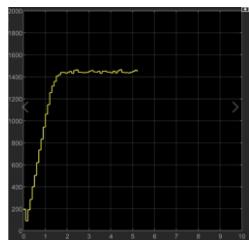


Рис. 20. График скорости вращения

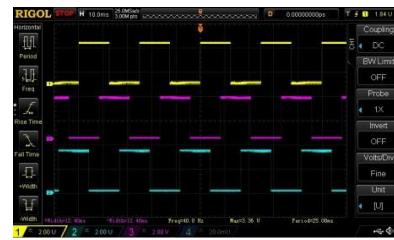


Рис. 21. График осциллографа аппаратного ШИМа

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной была построена силовая система микроконтроллерного управления асинхронным двигателем на базе стенда Texas Instruments и контроллера STM32F405 на основе модельно-ориентированного проектирования. Для этого в процессе исследования была построена и промоделирована система управления двигателем в Matlab Simulink, после чего была интегрирована в систему управления двигателем Texas. Задача по поддержанию заданного значения скорости двигателя успешно решена и проверена экспериментально на физическом

объекте. Полученные результаты показали перспективность развития модельно-ориентированного проектирования управления электроприводом. Будущая работа будет включать синтез более сложных моделей с векторным управлением и их экспериментальную отработку законов управления на испытательном стенде с компонентами силовой электроники.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бартенев В.Г. Модельно-ориентированное проектирование программируемых радиотехнических устройств. Практический курс. – М.: Изд-во ИнфоКомКнига, 2019. – 214 с.
- Модельно-ориентированное проектирование по стандарту DO-254 с помощью инструментов компаний MathWorks и Mentor Graphics [Электронный текст]: URL: [https://matlab.ru/articles/DO-254\\_rus.pdf](https://matlab.ru/articles/DO-254_rus.pdf) (дата обращения: 06.06.2022).
- Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1994. – 327 с.
- Анучин А.С. Системы управления электроприводом. – М.: ИД МЭИ, 2015. – 190 с.
- TMDSHVMTRPFCKIT // Quick Start Guide [Электронный текст]: URL: [https://www.ti.com/lit/ml/sprugu7/sprugu7.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-wwe&DCM=yes&ref\\_url=https%3A%2F%2Feu.mouser.com%2F&distId=26](https://www.ti.com/lit/ml/sprugu7/sprugu7.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-wwe&DCM=yes&ref_url=https%3A%2F%2Feu.mouser.com%2F&distId=26) (дата обращения: 05.05.2022).
- TMS320F28335 // Texas Instruments [Электронный текст]: URL: <https://www.ti.com/product/TMS320F28335> (дата обращения: 06.06.2022).
- User manual STM32F407 Discovery kit [Электронный текст]: URL: <https://static.chipdip.ru/lib/485/DOC001485844.pdf> (дата обращения: 06.06.2022).

# Синергетический синтез автопилота для управления движением самолета-амфибии Бе-200ЧС при заборе воды

Попов Иван Андреевич

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*ivropov@sfedu.ru*

**Аннотация.** Доклад посвящен проблеме управления самолетом-амфибией Бе-200ЧС при заборе воды в режиме глиссирования. Приведено обоснование выбора математической модели движения самолета на воде. Представлена процедура синергетического синтеза регулятора автопилота самолета-амфибии в режиме забора воды.

**Abstract.** The report is devoted to the problem of control of the Be-200ChS amphibious aircraft during water intake in the gliding mode. The substantiation of the choice of the mathematical model of aircraft movement on water is given. A procedure for the sinergetical synthesis of the autopilot controller of an amphibious aircraft in the water intake mode is presented.

**Ключевые слова:** самолет-амфибия, Бе-200ЧС, глиссирование, синергетический синтез, забор воды.

**Keywords:** amphibious aircraft, Be-200, gliding mode, sinergetical synthesis, water intake.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из характерных режимов полета любого самолета-амфибии (СА) является режим глиссирования – режим движения, при котором самолет удерживается на воде за счет его скоростного напора (скольжения). Управление самолетом в режиме глиссирования требует от летчика высочайшей концентрации, поскольку гидродинамические характеристики уменьшаются, но растут аэродинамические, из-за чего появляются ситуации, при которых СА становится неуправляемым. Данный режим движения возникает благодаря специальной форме корпуса, а также из-за большой скорости движения лодки. При коэффициенте числа Фруда  $F_r > 3$  гидродинамическая сила становится основной силой поддержания объекта на воде, происходит всплытие судна на определенный угол дифферента  $\varphi$ . В результате общая масса лодки практически полностью уравновешивается гидродинамической подъемной силой. Задача управления самолетом-амфибией в этом режиме усложняется еще сильнее при заборе воды во время глиссирования, а также последующего взлета с водной поверхности после окончания забора воды. Для обеспечения безопасной эксплуатации СА во время забора воды, а также обеспечения установившегося взлета, летчик вынужден выдерживать определенное значение скорости, угла диф-

ферента, а также тяги двигателей путем перебора ручки управления двигателем (РУД). В этом случае целесообразным будет использование автопилота, синтезированного таким образом, чтобы обеспечивать контроль скорости, тяги двигателя и угла дифферента для обеспечения устойчивости движения СА во время забора воды.

## II. ДВИЖЕНИЕ САМОЛЕТА-АМФИБИИ НА РЕЖИМЕ ГЛИССИРОВАНИЯ

### A. Особенности режима глиссирования

При скольжении самолета по воде и смачиваемая поверхность корпуса гидросамолёта, и возмущение воды, вызванное движением гидросамолёта, существенно меньше, чем при «нормальном» плавании с той же скоростью. Соответственно, уменьшаются и затраты энергии на преодоление сопротивления воды движению летательного аппарата. Подъёмная сила гидросамолёта, позволяющая реализовать режим глиссирования, является суммой аэродинамической подъёмной силы крыла и динамической реакции воды. Для этого днище гидросамолёта выполняется с реданом и скулами. Такая форма днища способствует срыву струй на режиме глиссирования, вследствие чего уменьшаются смачиваемая поверхность корпуса и сила трения о воду [1]. Наиболее эффективное глиссирование лодки достигается при наличии редана - ступеньки на днище, которая служит для отрыва потока от днища и уменьшения смачиваемой поверхности лодки, что, в свою очередь, ведет к уменьшению гидродинамического сопротивления.

Ключевая особенность режима глиссирования СА – существование граничных значений углов дифферента, выход за которые влечет за собой возникновение продольных колебаний даже на спокойной воде, что создает существенные проблемы управления самолетом-амфибией, особенно на высоких скоростях глиссирования [2]. В проектировании гидросамолетов устанавливаются границы устойчивости движения СА по воде, выход за которые означает потерю устойчивости (рис. 1).

При изучении особенностей режима глиссирования также важно знать, что возникающие колебания по углу дифферента (продольные угловые колебания в верти-

кальной плоскости) также способствуют появлению наибольших вертикальных перемещений (колебаний) центра тяжести гидросамолета, что является главной причиной потери путевой устойчивости.

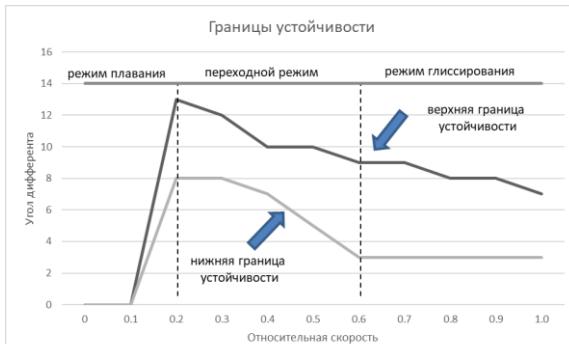


Рис. 1. Границы устойчивости самолета-амфибии

Процесс разбега СА не всегда может окончиться успешным взлетом, т.к. в целом ряде случаев сопротивление воды оказывается столь значительным, что максимальная тяга СА, вполне достаточная для его полета в воздухе, не может сообщить ему скорость, необходимую для взлета.

При глиссировании на редане может случиться, что самолет оторвется от воды раньше, чем достигнет взлетной скорости, после чего он снова коснется воды (барс). При этом все его части и агрегаты испытывают значительные перегрузки, что иногда бывает очень опасно, поскольку при потере скорости самолет может скользнуть на крыло и упасть в воду. Барсы могут быть вызваны также продольным колебанием – наличием волн, особенно если период колебаний СА совпадает с волновыми ударами, а также неправильными действиями летчика, слишком сильно раскачавшего СА или же прихватившего носовую часть лодки.

## B. Гидродинамика глиссирующего судна

При движении гидросамолёта на воде вся смоченная поверхность его лодки и поплавков подвергается силовому воздействию со стороны воды. Находясь в движении и противодействуя возникающим силам, гидросамолёт расходует свою энергию, которая передается воде. Эта энергия остаётся в ней в виде энергии движения, превращающейся в тепло и со временем затухающей. Со стороны воды на корпус лодки действуют сила гидродинамического поддержания и сила сопротивления движению глиссирования на воде.

В соответствии с законами аэро- и гидродинамики, действующими в процессе разбега, несущие поверхности по мере увеличения скорости движения гидросамолёта начинают нести все больший вес, помогая этим самым гидростатическим силам, действующим на днище лодки, выталкивать самолет из воды. И в тот момент, когда гидросамолет приобретает скорость, при которой подъемная сила крыльев становится равна весу, происходит взлет самолета с воды [3].

Явление глиссирования носит ярко выраженный ударный характер. Перед днищем лодки гидросамолёта вода практически находится в покое, а затем, в кратчайший промежуток времени, приводится в интенсивное движение, надвигающимся днищем гидросамолёта. Та-

кое, резко ускоренное, движение воды даёт основание считать доминирующими силами силы инерции, а не весомости воды.

Описание физических явлений, возникающих при глиссировании, является достаточно сложной задачей, поскольку картина изменения и распределения скоростей и давлений обтекающего лодку потока значительно затрудняет разработку законов, наиболее адекватно и достоверно описывающие явление глиссирования на высоких скоростях.

При переходе в режим глиссирования происходит резкое снижение волнообразования вокруг корпуса, за счет чего уменьшается общее сопротивление. При движении в режиме глиссирования из-за увеличения скорости движения судна общее сопротивление судна возрастает прямо пропорционально увеличению сопротивления трения [4]. Скачки сопротивления особенно заметны на реданных суднах.

Одной из важных особенностей режима глиссирования является появление существенных нагрузок на корпус лодки самолета-амфибии, что является результатом ударного (динамического) взаимодействия с водой, что особенно сильно проявляется при волновых возмущениях.

Образование брызговых струй, волн и сильных перепадов давления сильно влияют на определение движения массы возмущенной воды вокруг глиссирующего судна, что, в свою очередь, влияет на возникновение наибольших продольных колебаний гидросамолета по углу дифферента (продольные угловые колебания в вертикальной плоскости).

Основными проблемами при исследовании явления глиссирования твёрдых тел по поверхности жидкости заключается в определении гидродинамических сил, действующих на тело, а также в решении проблемы удара об воду твердого тела.

## III. ЗАБОР ВОДЫ НА РЕЖИМЕ ГЛИССИРОВАНИЯ

### A. Особенности забора воды

Самым оптимальным режимом для забора воды является режим глиссирования. Это обусловлено несколькими факторами [5]:

- высокий диапазон скоростей, из-за чего самолет после набора воды сразу может взлететь;
- интенсивный рост аэродинамических характеристик (по сравнению с режимом плавания и переходным режимом), что позволит легко компенсировать вес набранной воды увеличивающейся подъемной силой крыла;
- незначительное влияние гидростатических характеристик (практически нет осадки, нагрузки на воду от веса самолета, брызгообразования и заливания надводных частей);
- суммарное (аэродинамическое+ гидродинамическое) сопротивление самолета на высоких скоростях меньше, чем на низких из-за физического процесса изменения сил, действующих на самолет.

Однако, из-за динамики движения самолета по воде на больших скоростях, возникают свои проблемы, требующие внимания, а именно:

- большой разброс значений скорости самолета из-за худших (по сравнению с сухой взлетно-посадочной полосой (ВПП)) возможностью визуального контроля высоты (проблема посадки на воду, удар об воду твердого тела);
- при заборе воды, чтобы избежать преждевременного взлета, пилот постоянно регулирует скорость, перебирая РУДы «по состоянию», что требует повышенной концентрации только из-за контроля скорости. Из-за инерционности самолета это регулирование скорости не может быть точным, поэтому сильно повышается вероятность «провалов» скорости, что, в результате, может повлиять как на величину дистанции забора воды, так и на возможность выполнения правильно го взлета с воды в соответствии с разработанной методикой.

Скорость при заборе воды должна выдерживаться автоматически, при этом разрабатываемая автоматика должна управлять как положением водозаборного устройства (ВЗУ), так и тягой двигателя.

#### B. Методика забора воды

Набор воды на глиссировании должен выполняться таким образом, чтобы не превысить максимально допустимый вес самолета. В системе набора воды на самолете Бе-200 предусмотрены 3 варианта количества забираемой воды: 6т, 9т и 12т. Пилот, при заходе на посадку, зная остаток топлива и посадочный вес самолета, устанавливает возможное количество воды из условия не превышения максимального взлетного веса самолета  $G_{max}$ :

$$G_{max\_vzl} = G_{pos} + G_{vod} \leq G_{max}, \quad (1)$$

где  $G_{pos}$  – вес самолета при посадке,

$G_{vod}$  – количество забираемой воды,

$G_{max}$  – максимальный взлетный вес (у самолета-амфибии Бе-200ЧС  $G_{max} = 43$ т)[6].

Существующий алгоритм посадки, а затем и последующего забора воды подтвержден летными и мореходными испытаниями самолета Бе-200, а также разработанными методиками, позволяющими проводить расчеты характеристик установившегося движения самолета-амфибии на воде. Все скорости и диапазоны изменения установившегося режима движения самолета были взяты из руководства по летной эксплуатации (РЛЭ) самолета Бе-200ЧС [6].

1. Посадка самолета начинается с воздушного участка, который состоит из дистанций планирования (снижение по глиссаде с углом наклона траектории примерно  $2^{\circ}40'$ ), дистанции выравнивания и дистанции выдерживания. Приводнение осуществляется в посадочной конфигурации самолета ( $\delta_{закр} = 38^{\circ}$ ,  $\delta_{пр} = 20^{\circ}$ ) уже с выпущенным ВЗУ. На высоте  $H = 60$ м пилот принимает

окончательное решение о заходе на посадку, после чего РУДы переводятся в режим «малый газ», а также происходит выпуск ВЗУ. Скорость захода на посадку должна выдерживаться в диапазоне  $190 \div 200$  км/ч;

2. Во время удара об воды есть большая вероятность отскока самолета после касания воды с последующим приводнением на низкой скорости. Чтобы нивелировать последствия удара самолета об воду (насколько это возможно) во время приводнения летчик вручную устанавливает постоянное значение угла тангажа  $\varphi = 6,5^{\circ}$ , что позволяет компенсировать резко возникающие продольные угловые колебания при посадке на воду;
3. После удара об воду начинается процесс забора воды. Через 1,5 секунды после посадки на воду РУДы переводятся во взлетный режим. Перевод осуществляется 5 секунд, из-за чего первые 6,5 секунд забора воды будет заметное падение скорости вследствие недостатка тяги двигателя;
4. Через 6,5 секунд (РУДы переведены во взлетный режим) и до окончания забора необходимого количества воды летчик интенсивно контролирует скорость движения самолета, а также тягу двигателей, чтобы не допустить преждевременного взлета. Скорость самолета во время забора воды должна находиться в диапазоне  $180 \div 210$  км/ч. Также пилот должен контролировать положение угла дифферента  $\varphi$  и не допускать его уменьшения ниже  $3^{\circ}$ ;
5. Одновременно с этим летчик не должен пропустить момент достижения самолета скорости приятия решения  $V_1$ , а также вовремя перевести механизацию самолета во взлетную конфигурацию ( $\delta_{закр} = 20^{\circ}$ ,  $\delta_{пр} = 20^{\circ}$ );
6. После забора необходимого количества воды ВЗУ убирается, самолет разгоняется до скорости отрыва  $V_{отр}$ . Скорость отрыва варьируется в диапазоне  $185 \div 205$  км/ч и определяется в зависимости от скорости окончания забора воды  $V_{заб}$

$$V_{отр} = V_{заб} + 30;$$

Взлет самолета с воды происходит при достижении скорости отрыва, а также при установленном угле дифферента  $\varphi \approx 6^{\circ}$ ;

7. После взлета с воды идет набор безопасной высоты  $H_{без} = 10,7$ м, до момента достижения которой пилот должен еще раз принять решение о продолжении взлета либо об аварийном сбросе воды на высоте сброса  $H_{сброс} = 2$ м.

#### IV. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СА ВО ВРЕМЯ ЗАБОРА ВОДЫ

Наиболее сложной задачей при разработке математической модели движения самолета-амфибии в режиме глиссирования является нахождение коэффициентов гидродинамических сил и моментов, действующих на объект.

В данной работе рассматривалось только продольное движение СА. При рассмотрении данной модели считается, что углы крена и рыскания СА пренебрежимо малы, а соответствующие им угловые скорости и ускорения равны нулю [7]. Тогда полученная в итоге система уравнений (2) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= -g \sin \theta + \frac{P}{m} \cos(\vartheta - \theta) + \frac{qS}{m} (c_x \cos(\vartheta - \theta) - c_y \sin(\vartheta - \theta)) - c_W, \\ \dot{\theta} &= -\frac{g}{V} \cos \theta + \frac{P}{mV} \sin(\varphi + \vartheta - \theta) + \frac{qS}{mV} (c_x \sin(\vartheta - \theta) + c_y \cos(\vartheta - \theta)) + c_B, \\ \dot{\omega}_z &= \frac{qSb_A}{J_z} (m_z - m_{z_h}) \\ \dot{x} &= V \cos \theta, \\ \dot{H} &= V \sin \theta, \\ \dot{\vartheta} &= \omega_z.\end{aligned}\quad (2)$$

Гидродинамические характеристики самолета определены по данным буксировочных испытаний моделей самолета Бе-200 в гидроканале ЦАГИ [8]. При помощи теории подобия был сделан пересчет с модели на натуре, после чего получены безразмерные коэффициенты гидродинамических сил и гидродинамического продольного момента [9, 10].

Выражения для вычисления гидродинамических сил  $c_W$  и  $c_B$ , а также гидродинамического продольного момента  $m_{z-h}$  можно записать следующим образом [11]:

$$c_W = \frac{W}{\rho V^2 B^2}, \quad (3)$$

где  $c_W$  – коэффициент полного гидродинамического сопротивления,

$W$  – полное гидродинамическое сопротивление (с учетом сопротивления воды и сопротивления ВЗУ),

$\rho$  – плотность воды ( $\approx 998$  кг/м<sup>3</sup>),

$V$  – скорость самолета,

$B$  – ширина лодки (смачиваемой поверхности самолета).

$$c_B = \frac{A}{\rho V^2 B^2}, \quad (4)$$

где  $c_B$  – коэффициент гидродинамической нагрузки на воду,

$A$  – гидродинамическая подъемная сила,

$\rho$  – плотность воды ( $\approx 998$  кг/м<sup>3</sup>),

$V$  – скорость самолета,

$B$  – ширина лодки (смачиваемой поверхности самолета).

$$m_{z-h} = \frac{M_z}{\Delta B}, \quad (5)$$

где  $m_{z-h}$  – коэффициент гидродинамического продольного момента,

$M_z$  – продольный гидродинамический момент,

$\Delta$  – нагрузка на воду,

$B$  – ширина лодки (смачиваемой поверхности самолета).

## V. СИНЭРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АВТОПИЛОТА

### A. Управление продольным движением СА

Одной из наиболее востребованных задач автоматического управления СА является задача синтеза систем управления взлетом и посадкой на водную поверхность. Ключевой особенностью для решения этой задачи является разработка синтезированных законов управления, обеспечивающих балансировку самолета при взлете и посадке [12], а также учитывающих влияние внешней среды, т.е. адекватное изменение аэро- и гидродинамических характеристик [13].

Для разработки законов управления в работе используется метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (метод АКАР), основанный на синергетической теории управления [14–16].

При решении задачи управления СА на взлете и посадке рассматривается только продольное движение самолета. Математическая модель движения самолета, дополненная выражениями аэро- и гидродинамических сил, и момента уже была упомянута ранее (2).

Управление продольным движением СА достигается путем отклонения органов управления: РУДов и руля высоты. Соответственно, в модели продольного движения СА будет только 2 управляемых воздействия: изменение силы тяги двигателей  $P$ , зависящей от отклонения РУДов, и суммарный продольный момент  $m_z$ , зависящий от угла стабилизатора высоты, который выставляется путем отклонения руля высоты.

Согласно методу АКАР, введем первую совокупность макропараметров, которые будут обеспечивать установившееся продольное движение в определенном интервале времени с заданной скоростью  $V_0$  и углом дифферента  $\varphi_0$ :

$$\psi_1 = V - V_0 \quad (6)$$

$$\psi_2 = \sin \theta - \varphi_0. \quad (7)$$

В итоге, на пересечении инвариантных многообразий при  $\psi_i = 0, i = 3 \dots 6$  происходит динамическая декомпозиция (сжатие фазового пространства), и динамика рассматриваемой системы будет описываться следующей декомпозированной моделью:

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_z &= \frac{qSb_A}{J_z} (m_z - m_{z-h}) \\ \dot{x} &= V_0 \cos \theta \\ \dot{H} &= V \sin \theta, \\ \dot{\vartheta} &= \omega_z.\end{aligned}\quad (8)$$

Следующим шагом введем еще одну макропараметрную, которая будет обеспечивать стабилизацию движения гидросамолета на заданной высоте  $H_0$ :

$$\psi_3 = H - H_0. \quad (9)$$

В результате, закон управления движением самолета-амфибии ищется из решения системы функциональных уравнений АКАР:

$$\begin{aligned} T_1 \frac{d\psi_1}{dt} + \psi_1 &= 0, \\ T_2 \frac{d\psi_2}{dt} + \psi_2 &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

В итоге путем решения функциональных уравнений и уравнений модели была получена совокупность внешних управлений, обеспечивающих желаемые параметры движения СА. Из-за громоздкости полученного закона управления будет непрактично приводить его полную версию в данной работе.

### B. Моделирование посадки на воду

Алгоритм посадки на воду был описан в работе ранее. Задача синергетического синтеза автопилота для посадки на воду аналогична задаче управления продольным движением на воде за исключением требований, рекомендованных к совершению посадки на воду в соответствии с РЛЭ самолета [6].

Задача управления самолетом в режиме посадки на воду заключается в приводнении самолета на воду с необходимой скоростью  $V$  и углом тангенса  $\vartheta$ , в результате чего возникающие продольные колебания вследствие удара самолета об воду будут минимальными.

Вводимые инвариантные многообразия будут идентичными (6) и (7), а декомпозированная модель, очевидно, будет такой же (8) за исключением гидродинамической составляющей от продольного момента:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_z &= \frac{qSb_A}{J_z} m_z \\ \dot{x} &= V_0 \cos \theta \\ \dot{H} &= V \sin \theta, \\ \dot{\vartheta} &= \omega_z. \end{aligned} \quad (11)$$

### C. Управление процессом забора воды

Управление продольным движением самолета во время забора воды имеет свои особенности по сравнению с обычным продольным движением СА. При заборе воды в модели необходимо учитывать изменение массы самолета, а значит и изменение сопротивления. Данная зависимость учитывается добавлением расчетных формул изменения гидродинамического сопротивления, а также возрастанием скорости СА посредством увеличения тяги двигателя при его переходе на взлетный режим.

Также необходимо учитывать изменение гидродинамического сопротивления от выпуска ВЗУ, которое рассчитывается по формуле:

$$W_{zab} = 0.93 * S_{zab} * \rho_{zab} * V^2, \quad (12)$$

где  $S_{zab}$  – площадь ВЗУ,

$\rho_{zab}$  – плотность воды при прохождении через водо-заборный тракт,

$V$  – скорость СА (с учетом потерь при заборе воды).

В результате измененный коэффициент гидродинамического сопротивления будет выглядеть следующим образом:

$$c_W = \frac{W_{full}}{\rho V^2 B^2}, \quad (13)$$

где  $W_{full} = W_{zab} + W_{vod} + W_m$  – полное гидродинамическое сопротивление с учетом сопротивления ВЗУ ( $W_{zab}$ ), сопротивления воды ( $W_{vod}$ ) и изменения сопротивления самого СА из-за увеличения его массы ( $W_m$ ).

### D. Результаты моделирования

Процедура синергетического синтеза модели продольного движения проводилась в Maple. Полученные законы управления в дальнейшем применялись для математического моделирования в пакете Matlab, а также для дальнейшего построения графиков функций. Наиболее наглядными параметрами, демонстрирующими адекватность полученных результатов, являются скорость  $V$ , угол наклона траектории  $\theta$ , высота  $H$  и угла тангенса (дифферента)  $\vartheta$ . Результаты моделирования представлены в виде графиков функций на рис. 2-5. Моделировалась снижение по глиссаде, посадка на воду, забор воды и последующий взлет самолета.

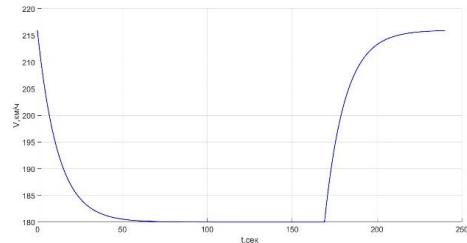


Рис. 2. График изменения скорости  $V$

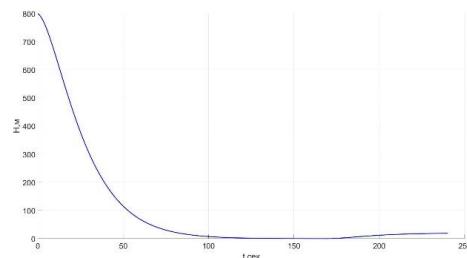


Рис. 3. График изменения высоты  $H$

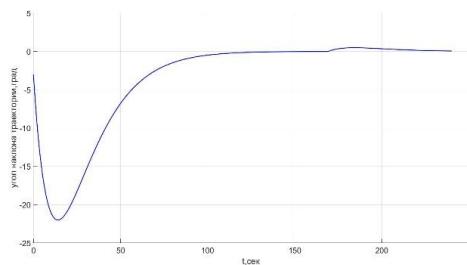


Рис. 4. График изменения угла наклона траектории  $\theta$

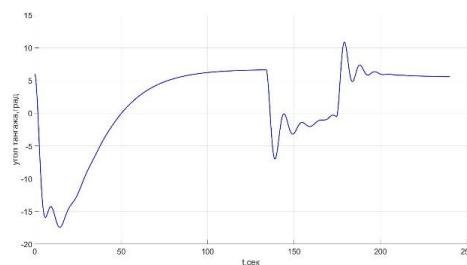


Рис. 5. График изменения угла тангенса (дифферента)  $\vartheta$

## VI. Выводы

Полученные результаты демонстрируют выполнение автопилотом поставленных задач, синтезированный регулятор обеспечивает асимптотическую устойчивость в заданном диапазоне. Однако, несмотря на то, что регулятор полностью выполняет задачу обеспечения устойчивости движения самолета, он не учитывает изменение массы самолета при заборе воды на режиме глиссирования. Предполагается, что при учете изменения массы самолета, а значит, и изменении его аэро- и гидродинамических характеристик, колебания по углу дифферента при движении самолета на воде, а, в частности, при посадке на воду, будут практически отсутствовать.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Авиация: Энциклопедия. – М.: Большая Российская Энциклопедия. Главный редактор Г.П. Свищев. 1994.
2. Косуров К.Ф. Теоретические основы гидравиации. – М.: Воениздат, 1961.
3. Волков Г. Основы гидравиации. – М.: Воениздат, 1940.
4. Лотов А.В. Глиссирование и быстрый вход тел в воду. – М.: Изд-во МФТИ, 1984.
5. Дурицын Ю.Г., Анастасов В.К., Самохин В.В., Сафонов П.В. Основы гидромеханики гидросамолета. – Таганрог, 2016.
6. Самолёт-амфибия Бе-200ЧС. Руководство по лётной эксплуатации. Книга 1 «Лётное руководство». А201.0000.000 РЛЭ-1.
7. Остославский И.В., Стражева И.В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 2005.
8. Дурицын Ю.Г., Дурицын Д.Ю. Гидродинамические испытания моделей гидросамолетов. – Таганрог, 2015.
9. Энштейн Л.А. Методы теории размерностей и подобия в задачах гидромеханики судов. – Л.: Судостроение, 1970.
10. Банников Ю.М., Лукашевский В.А., Лукьянов С.С. Математическая модель движения гидросамолета на волнении // Сб. докладов I Научной конференции по гидравиации «Геленджик-96». – М.: Изд-во ЦАГИ, 1996.
11. Справочник авиаконструктора. Т. II. Гидромеханика гидросамолета. – М.: Изд-во ЦАГИ, 1938.
12. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полётом. – М.: Наука: Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1987.
13. Колесников А.А. Новые нелинейные методы управления полетом. – М.: Физматлит, 2013. – 193 с.
14. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. ФЦ «Интеграция». – М.: Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. Ч. II.
15. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
16. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – М.: КомКнига, 2006.

# Модель высоты барьера Шоттки как функция управляемого состава х для твердых растворов SiC

Санкин Александр Викторович

Северо-Кавказский федеральный университет,  
(филиал) в г. Пятигорске, Россия  
*zam-id@pfncfu.ru*

Алтухов Виктор Иванович

Северо-Кавказский федеральный университет,  
(филиал) в г. Пятигорске, Россия  
*Altukhovv@mail.ru*

**Аннотация.** В работе рассмотрены характеристики монокристаллов SiC и силовых полупроводниковых приборов с барьером Шоттки на его основе. Такие приборы разрабатываются для работы в экстремальных условиях эксплуатации: высокие температуры, давления, радиационная и химическая стойкость. При этом силовые электронные ключи не должны терять заявленных свойств до 400–500 °C. Приведены прямые и обратные вольт-амперные характеристики диодов с барьером Шоттки на основе SiC.

**Abstract.** The paper considers the characteristics of single crystals SiC and power semiconductor devices with a Schottky barrier based on it. Such devices are designed to work in extreme operating conditions: high temperatures, pressures, radiation and chemical resistance. At the same time, power electronic keys should not lose their declared properties up to 400–500 °C. The forward and inverse Volt-ampere characteristics diodes with the Schottky barrier based on SiC are given.

**Ключевые слова:** монокристаллы SiC, твердые растворы, барьер Шоттки, вольт-амперная характеристика.

**Keywords:** SiC single crystals, solid solutions, Schottky barrier, volt-ampere characteristic.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Новые, и в первую очередь, широкозонные материалы, диоды и гетеропереходы на их основе играют важную роль в развитии экстремальной силовой электроники, и в том числе космической, авиационной технике, автомобильной промышленности, медицине, оборонной промышленности и при создании ракет с гиперзвуковой скоростью. По результатам исследований можно утверждать, что в настоящее время основным перспективным материалом силовой электроники является именно карбид кремния (SiC). Карбид кремния обладает уникальными свойствами, такими как химическая инертность, термическая устойчивость, высокая теплопроводность, высокое напряжение электрического пробоя, механическая прочность и другими важными для электроники характеристиками. Совершенные монокристаллы SiC являются незаменимыми материалами при изготовлении подложек, буферных слоев, пленок в устройствах и приборах силовой электроники, важнейшими из которых являются диоды с барьером Шоттки.

Как известно, в области контакта металл – полупроводник возникает барьер Шоттки, а в гетеропереходах появляется потенциальный барьер, со значениями высоты, показанными в источниках [1, 2]. При этом однако, остается вопрос построения обобщенной модели токопереноса через гетеропереход (ГП) типа n-SiC/p-(SiC)<sub>1-x</sub>(AlN)<sub>x</sub> или через диод с барьером Шоттки (БШ) Me/SiC<sub>1-x</sub>(AlN)<sub>x</sub>. В диодах с барьером Шоттки, а также в гетеропереходах имеется ряд механизмов токопереноса, которые могут действовать одновременно при разных приложенных напряжениях [3, 4]. Помимо этого, вольт-амперные характеристики диодов и гетеропереходов сильно зависят от технологии их получения и от наличия поверхностных состояний на границе перехода. Известные модели [5] не объясняют до конца поведение ВАХ и не дают полной интерпретации экспериментальных данных.

Это дает о себе знать также в гетероструктурах на основе недостаточно изученных полупроводниковых материалов, такими являются твердые растворы кремния с нитридом алюминия SiC-AlN. В этих структурах при напряжениях U<0.5 В преобладает механизм термоэлектронной эмиссии. В области более высоких напряжений на кривых ВАХ наблюдается действие еще 2-х механизмов токопереноса. Ниже показано, что при 0.5<U<2.5 В это полевая термоэмиссия и при 2.5<U<5.2 В [6] термополевая эмиссия. Такая ситуация в гетеропереходах на основе SiC возникает, если в области контакта имеется избыточный заряд и высокая локальная плотность электронных состояний. Это эффект имеет объяснение как за счет поверхностных состояний, так и за счет дефектов, например Al или N. Известно, что Al в газовой фазе в основном находится в связанном состоянии в виде комплексов Al-N и Al-C [2]. Это приводит к возникновению в области гетероперехода локального квазиуровня Ферми. Тогда значение F<sub>g</sub> будет порядка F<sub>B</sub>, высоту которого можно вычислить по модели высоты барьера Шоттки. Такая ситуация подтверждается известным качественным сходством ВАХ для диодов Шоттки и обычных p-n переходов [6]. Низкое падение напряжения в прямом направлении диодов Шоттки позволяет создавать высокоеэкономичные силыноточные выпрямители и быстродействующие устройства микроэлектроники.

## II. Диоды и светодиоды (гетеропереходы) на основе карбида кремния и их вольт-амперные характеристики

В статье приведен расчет высоты потенциального барьера в области гетероперехода и ВАХ с эффективным локальным квазиуровнем Ферми  $E_F$ ; с единичных позиций в рамках составной модели объясняются особенности и сходство поведения ВАХ гетероструктур – диодов типа  $\text{Me}/\text{SiC}_{1-x}(\text{AlN})_x$  и  $n\text{-SiC}/p\text{-(SiC)}_{1-x}(\text{AlN})_x$ .

Проведены расчеты высоты барьера Шоттки по формулам, соответственно полученным ранее в следующем виде: для разных составов  $x$  при значениях  $E_g^x$ . На рис. 1. представлены значения  $\Phi_B^x(c)$  при 2-х значениях концентрации  $c=4$  и  $c=6$ . Кривая 2.

Тогда для высоты потенциального барьера Шоттки  $\Phi_B^x$  и чисел заполнения  $n_x(c)$  по получаем [7]:

$$\Phi_B^x(c) = p + k\eta c 2n_x(c) \quad (1)$$

$$\Gamma\delta_x(c) = p - (1 - \xi_i)E_g^x + k\eta c(1 - cv) \quad (2)$$

$$n_x(c) = (1/\pi) \cdot \arccot \delta_x(c) \quad (3)$$

здесь  $k=0.272$  эВ,  $p=\Phi_m - \chi$ ; энергия поверхностных состояний  $E_i = E_g \xi_i$ ,  $\xi_i = 0.3$  (0.5; 0.7); ширина барьера  $\lambda=3\eta\text{Å}$ ,  $\eta=0.5\text{--}2.0$ ; в приближении  $c^2$  при  $2n_{x0} \approx 1 - cv$ , где  $v$  – коэффициент разложения, принимающий значения от 0 до 1/30.

Результаты расчётов по (2), (3) высоты барьера Шоттки как функции параметров нелинейной модели (БШН)  $\xi_i$ ,  $x$  и  $c$  [7] представлены на рис. 1.

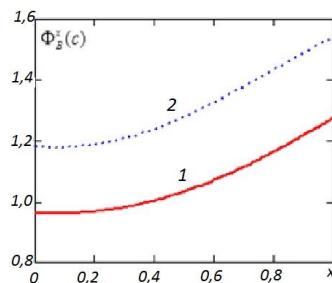


Рис. 1. Расчет высоты барьера Шоттки как функция состава  $x$  для модельной системы  $n\text{-Al}/p\text{-(SiC)}_{1-x}(\text{AlN})_x$  при  $c=4$ ;  $E_f=0.3E_g$  (кривая 1) и  $E_f=0.5E_g$  (кривая 2). Расчет [7, 8]

В гетеропереходах типа  $n\text{-SiC}/p\text{-(SiC)}_{1-x}(\text{AlN})_x$  на границе перехода в области с высокой плотностью состояний носителей заряда, фактически появляется локальный квазиуровень  $E_F$ . Тогда носители тока проникают в  $p\text{-SiC}$  через барьер интенсивно, как в металле и токопрохождение через  $\Phi_B^x$  будет подобно, как и в на контакте в диодах с БШ:  $\Phi_B^x$  порядка  $\Phi_g^x$ . Токоперенос будет иметь характер термоэлектронной ( $te$ ), полевой ( $p$ ) или термополевой ( $tp$ ) эмиссии в зависимости от напряжения  $U$ . Такое поведение, как отмечалось, объясняет качественное сходство вольт-амперных характеристик обычных  $p\text{-}n$  переходов и диодов с барьером Шоттки и [4]. В итоге для описания ВАХ гетеропереходов и диодов на основе карбида кремния в широком диапазоне напряжений:  $0 < U < 5 \div 15$  В можно предложить составную (аддитивную) модель токопереноса в следующем виде. При низких напряжениях в интервале:  $0 < U < 0.5$  В токовая со-

ставляющая обусловлена термоэлектронной эмиссией. Вклад составляющей полевой эмиссии, начинает проявляться в диапазоне напряжений при:  $0.5 < U < 2.5$  В. Наблюдение термополевой эмиссии проявляется в интервале напряжений:  $2.5 < U < 5$  В [4].

Результаты расчетов по формуле (3) представлены на рис. 2, где приведены и значения соответствующих параметров.

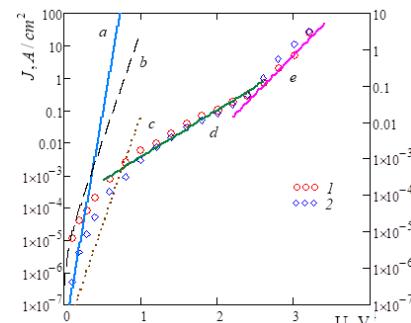


Рис. 2,а. Расчет по (3) прямых ветвей ВАХ ГП  $n\text{-SiC}/p\text{-(SiC)}_{1-x}(\text{AlN})_x$

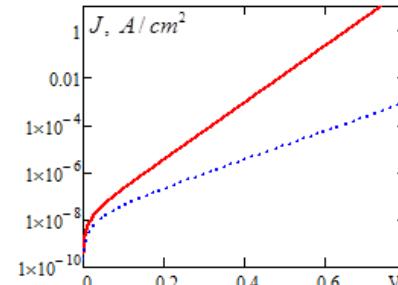


Рис. 2,б. Расчет по (3) прямых ветвей ВАХ ГП  $n\text{-SiC}/p\text{-(SiC)}_{1-x}(\text{AlN})_x$  в полулогарифмическом масштабе [7, 8]

а) Прямые ветви ВАХ структур  $\text{Al}/n\text{-(SiC)}_{1-x}(\text{AlN})_x$  при  $T = 293$  К: по формуле (7) при  $x=0.10$  ( $n=1$  для кривой а и  $n=2$  для б); при  $x=0.15$  ( $n=2$  для с); прямая д при  $J_{tp}^x = 1.3 \cdot 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ ,  $n_2=5$ ,  $m_2=3$ ; прямая е при  $J_p^x = 3 \cdot 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ,  $n=3$ ,  $m=3$ ; точки 1 и 2 – экспериментальные данные [5–7];

б) ВАХ в интервале напряжений от 0 до 0,8 В: сплошная –  $n_1=1$ , точки –  $n_1=2$ .

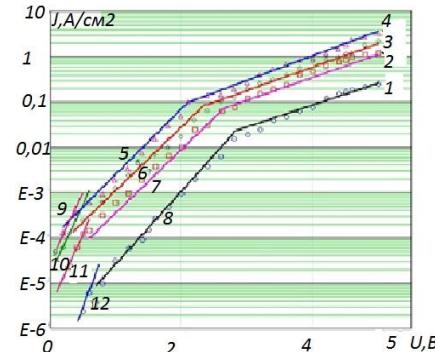


Рис. 3. Температурная зависимость вольт-амперных характеристик гетеропереходов  $n\text{-}6\text{H-SiC}/p\text{-(SiC)}_{0.85}(\text{AlN})_{0.15}$  [6]: данные расчетов – прямые линии (1-12); экспериментальные данные – точки [3]

На рис. 3 показаны рассчитанные вольтамперные характеристики для термоэлектронной эмиссии, полевой эмиссии и термополевой эмиссии соответственно при температурах [10]: 1–77; 2–273; 3–361; 4–418 K. Линии графика (1–4) –  $tp$  (термополевая эмиссия); линии графика (5–8) –  $p$  (полевая эмиссия); линии графика (9–12) –  $ss$  (термоэлектронная эмиссия). При расчетах применялись следующие значения:

$I_{tp}^x = 1; 3.3; 5; 7 (10^{-3} A/cm^2)$  для графиков 1, 2, 3, 4. Для температур  $T_i = 77; 273; 361; 418 K$  фактор идеальности при  $qU$  составляет  $n_2 = 5$  и при  $\Phi_B m_2^i = 8; 8.2; 8.4; 9$  для термополевой эмиссии; параметр  $E_0 \approx 0.025 eV$  (см. [7, 8]). Для полевой эмиссии  $I_p^x = 0.065; 1.4; 4.4; 9 (10^{-5} A/cm^2)$  (графики 8, 7, 6, 5 соответственно). Фактор при  $\Phi_B$ :  $n_1=3$  и при  $qU$ :  $m_1^i = 4.5; 5.1; 5.1; 5$ ; параметр  $E_{00} \approx 0.020 eV$ . Для термоэлектронной эмиссии ( $ss$ ) получаем:  $I_{ss}^x = 28; 15; 3; 0.04 (10^{-6} A/cm^2)$  (графики 9, 10, 11, 12). В этом случае  $n=1.5$  и  $m=1$ .

### III. ВАХ ОБРАТНОГО ТОКА

На рис. 4 показаны экспериментальные (а) и рассчитанные (б) обратные ветви ВАХ при различных составах  $x$ .

Графики на рис. 4,б существенно отличаются от данных опытов для этих систем на рис. 4,а. Это может быть вызвано различными значениями пробойного напряжения в обратном направлении. А также возможно неоднородным распределением высоты барьера по площади контакта; туннелированием, тепловой генерацией носителей в ОПЗ зависимостью высоты барьера от напряжения [9].

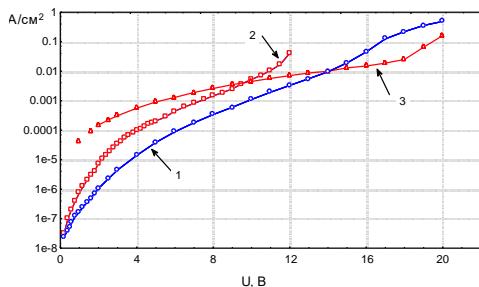


Рис. 4,а. Обратные ветви ВАХ ГП  $n\text{-SiC}/p\text{-(SiC)}_{1-x}\text{(AlN)}_x$  при  $T=300K$ . 1 –  $x=0.15$ ; 2 –  $x=0.24$ ; 3 –  $x=0.73$  [26]

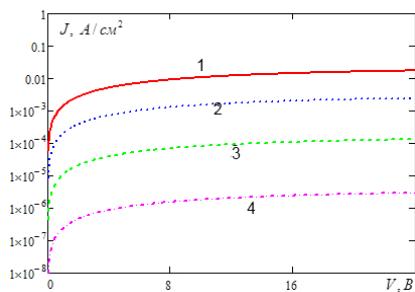


Рис. 4,б. Рассчитанные обратные ветви ВАХ ГП  $n\text{-SiC}/p\text{-(SiC)}_{1-x}\text{(AlN)}_x$  [7,8] при  $T=418 K$ ; 1 –  $x=0.15$ ; 2 –  $x=0.5$ ; 3 –  $x=0.75$ ; 4 –  $x=1$  для  $I_{ss}^x = 21.4; 3.1; 0.16; 0.04 (10^{-3} A/cm^2)$

В результате исследований, полученные в ходе расчетов значения напряжений перехода от полевой к термополевой эмиссии  $U_{\text{теор.}} = 2.10; 2.35; 2.60; 2.78$  согласуются с данными опытов [9]  $U_{\text{эксп.}} = 2.1; 2.4; 2.6; 2.8$  соот-

ветственно для температур  $T_i = 77; 273; 361; 418 K$ , что следует также из рис. 3. По данным этого рисунка определен температурный предэкспоненциальный множитель  $T_i^2$ . Большие значения факторов идеальности  $n_1=3$  для случая полевой эмиссии и  $n_2=5$  для термополевой эмиссии, тем не менее, не превосходят значения  $n=6$ , например, для GaN/GaInN-диодов [7]. Основное предположение настоящей работы состоит в том, что в зоне контакта возможно формирование локального квазиуровня Ферми и, как следствие, в диодах на основе карбида кремния и его твердых растворов  $\Phi_g \approx \Phi_B$ . Это предположение требует дополнительного подтверждения. Однако ясно, что высота потенциального барьера влияет только на значения токов насыщения  $I_{ss}$ ,  $I_p$  и  $I_{tp}$ . Характер же поведения  $I=I(U, x)$  (ВАХ) существенно зависит от факторов идеальности  $n$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  и характеристических энергий  $E_{00}$  и  $E_0$ . В итоге показано, что вольтамперные характеристики прямых токов диодов на основе SiC, рассчитанные в составной модели, хорошо согласуются с данными экспериментов.

Предложена модифицированная нелинейная по концентрации поверхностных состояний модель барьера Шоттки, содержащая локальный квазиуровень Ферми на границе раздела, обусловленного избыточным поверхностным зарядом. Такой подход позволяет объяснить наблюдающееся подобие ВАХ диодов с барьером Шоттки (БШ)  $\text{Me}/(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  и гетеропереходов на основе SiC и его твердых растворов с учетом  $\Phi_g \approx \Phi_B$ . Результаты расчетов высоты барьера Шоттки согласуются с данными опытов, полученными по фототоку для металлов (Me): Al, Ti, Cr, Ni. ВАХ в составной – аддитивной модели токопренося согласуются с данными экспериментов для систем n-Me/p-(SiC)<sub>1-x</sub>(AlN)<sub>x</sub> и n-6H-SiC/p-(SiC)<sub>0,85</sub>(AlN)<sub>0,15</sub>.

### ЛИТЕРАТУРА

- Давыдов С.Ю., Лебедев А.А., Тихонов С.К. ФТП, 31, 597 (1997).
- Давыдов С.Ю., Лебедев А.А., Посредник О.В., Таиров Ю.М. ФТП, 35, 1437 (2001).
- Алтухов В.И., Санкин А.В., Митюгова О.А. Обозрение прикладной и промышленной математики 17, 246 (2010).
- Исмаилова Н.П., Офицерова Н.В., Сафаралиев Г.К. Моделирование электрофизических свойств гетероструктур n-SiC/p-(SiC)<sub>1-X</sub>(AlN)<sub>X</sub> // Мониторинг. Наука и Технологии. – 2009. – № 1.– С. 117-124.
- Исмаилова Н.П., Офицерова Н.В., Сафаралиев Г.К. Моделирование электрофизических свойств гетероструктур n-SiC/p-(SiC)<sub>1-X</sub>(AlN)<sub>X</sub> // Мониторинг. Наука и Технологии. – 2009. – № 1.– С. 117-124.
- Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Физматлит, 2008.
- Алтухов В.И., Касьяненко И.С. Санкин А.В.и др. Расчет барьера Шоттки и вольт-амперных характеристик структур металл-твердые растворы на основе карбида кремния // Журнал «Физика и техника полупроводников». – 2016. – Т. 50. – Вып.9. – С. 1190-1194.
- Алтухов В.И., Санкин А.В., Казаров Б.А. Расчет новых свойств широкозонных полупроводниковых материалов Lambert Academic Publishing. Dusseldorf / Saarbrucken 2017, Gtrman: монография. – СКФУ, 2017. – 149 с.
- Сафаралиев Г.К. Твердые растворы на основе карбида кремния. – М., 2011. – 296 с.
- Алтухов В.И., Санкин А.В., Дядюк М.Н., Касьяненко К.С., Митюгова О.А., Филиппова С.В. Расчет высоты барьера Шоттки на контакте металлы-твердый раствор карбида кремния в структурах типа Al/n-SiC:AlN // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2012. – Т. 19. – Вып. 3. – С. 423-424.

# Методы преобразования и распределения энергии при использовании альтернативных источников

Скляров Сергей Анатольевич

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности

Южный федеральный университет

Таганрог, Россия

sasklyarov@sfedu.ru

Веселов Геннадий Евгеньевич

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности

Южный федеральный университет

Таганрог, Россия

gev@sfedu.ru

**Аннотация.** При использовании альтернативных источников энергии возникает проблема эффективного преобразования и распределения энергии. В работе рассмотрены существующие методы и механизмы управления силовыми энергетическими линиями, способы их организации, типы распределения нагрузки и их балансировка. Показаны наиболее существенные части системы оказывающие влияние на КПД, как отдельных элементов, так и всей установки в целом. Предложены улучшения общей системы распределения энергии и некоторых её элементов с учетом расширяемости и масштабируемости оборудования, а также способы ущемления управляющих и силовых узлов.

**Abstract.** When using alternative energy sources, the problem of efficient conversion and distribution of energy arises. The paper considers the existing methods and mechanisms for controlling power energy lines, ways of organizing them, types of load distribution and their balancing. The most significant parts of the system that affect the efficiency of both individual elements and the entire installation as a whole are shown. Improvements to the overall power distribution system and its individual elements are proposed, taking into account the expandability and scalability of equipment, as well as ways to reduce the cost of control and power units.

**Ключевые слова:** распределение энергии, преобразование энергии, альтернативные источники, силовые узлы.

**Key words:** energy distribution, energy conversion, alternative sources, power units.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее доступной и отработанной технологией альтернативной генерации энергии, являются солнечно-ветровые установки. В России за последние годы было достигнуто более 240 МВт мощности, генерируемой с помощью фотоэлектрических установок, а общая мощность фото электростанций (ФЭС) превысила 600 МВт [1]. Ветроэлектрические установки (ВЭУ) также получили огромное распространение по всему миру, и общая мощность всех ветрогенераторов достигла более 600 ГВт. Международное энергетическое агентство предполагает, что к 2050 г. электростанции на основе одних только солнечных батарей станут основным источником энергии и будут обеспечивать 16% мирового спроса [2].

Основной проблемой использования альтернативных источников энергии является низкий КПД генерирующей установки, продолжительность солнечного излучения и слабо прогнозируемые изменения погодных усло-

вий на локальных участках [3]. Поэтому для получения максимально доступной на данный момент энергии используют системы позиционирования и методы на основе алгоритмов поиска точки максимальной мощности [4, 5]. На эффективность всей установки дополнительно оказывают влияние элементы и узлы преобразования напряжения, которые в зависимости от нагрузки и режимов работы могут значительно повысить её КПД. Разработка методов контроля и управления вспомогательными электронными устройствами, работающими совместно с ФЭС и ВЭУ, является актуальной инженерно-технической задачей, направленной на повышение эффективности работы ветряных и фотоэлектрических систем в целом [6].

## II. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА ПОИСКА ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

Для достижения максимальной эффективности солнечного модуля при построении фотovoltaических (ФВ) систем выработки электрической мощности необходимо использовать алгоритм слежения за точкой максимальной мощности (ТММ, в зарубежной литературе MPPT – maximum power point tracking), чтобы при данных условиях передавать в нагрузку максимально возможную мощность солнечного модуля [7]. В подавляющем большинстве контроллеров MPPT в качестве алгоритма слежения за точкой максимальной мощности используется алгоритм возмущения и наблюдения ввиду простоты управляющих структур и реализации [8]. Это один из основных способов повышения энергетической эффективности, т.к. является реализацией режима отбора максимума мощности в соответствующей точке вольтамперной характеристики (ВАХ) солнечной батареи (СБ). На рис. 1 даны примеры ВАХ и вольт-ваттных характеристик (ВВХ) фотоэлектрической панели КСМ-160.

В качестве преобразователя энергии могут выступать понижающий, повышающий, инвертирующий преобразователи. Подобные схемы обеспечивают высокий КПД за счёт снижения количества силовых элементов, при этом массогабаритные показатели фильтра минимизируются высокими частотами преобразования [9]. При этом важно гарантировать устойчивое функционирование данных электрических схем и обеспечивать минимальные расход энергии на преобразование [10, 11].

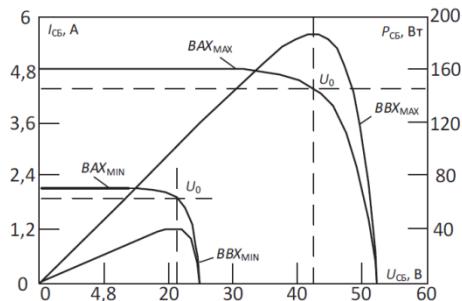


Рис. 1. BAX и BBX солнечной панели KCM-160

Общая эффективность ветряной турбины генератора так же может быть улучшена с помощью функций отслеживания точки максимальной мощности [12].

### III. МОДЕЛЬ ГИБРИДНОЙ КОМПОНОВКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

При сочетании нескольких источников, генерирующих энергию, требуется разработать механизм, при котором достигается наибольшая общая эффективность работы систем с помощью балансировки и распределения мощности.

Существуют некоторые технические решения, обеспечивающие эффективное использование потенциала возобновляемых источников энергии и оптимизацию режимов заряда/разряда аккумуляторных системы накопления энергии. Идея предлагаемого решения состоит в применении пассивной системы стабилизации напряжения на сборной DC шине за счет подключения к ней супер-конденсатора (SC) и управления энергетическим балансом в системе с помощью комбинированного накопителя энергии (CES), состоящего из двух идентичных аккумуляторных батарей (BB), поочередно работающих в режиме заряда/разряда, и регулируемой балластной нагрузки (BL) [13]. Предлагаемая обобщенная схема построения гибридной энергетической системы представлена на рис. 2.

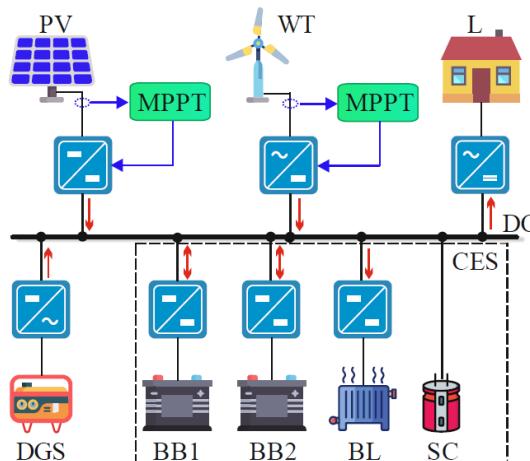


Рис. 2. Структурная схема гибридной электростанции с двухконтурным накопителем энергии

Основным недостатком данной компоновки является необходимость преобразования напряжения всех источников и аккумуляторов для поддержания общей DC шины. Для решения данной проблемы и улучшения устройства предлагается использовать две независимые

DC шины высокого и низкого напряжения. Это позволит избежать затрат на преобразование, а также сократит наличие силовых узлов высокой мощности. При этом локализация отдельной низковольтной DC шины в приделах каждого из аккумуляторов, исключает необходимость использования экстремально высоковольтных конденсаторов, т.к. батареи начинают использоваться в буферном режиме сглаживая все низкочастотные пульсации зарядных и разрядных токов. Так же пропадает потребность в двойном преобразовании при работе от аккумуляторов.

Дополнительным преимуществом такой компоновки является расширяемость системы простым добавление новых узлов генерации и накопления энергии. Наличие отдельной высоковольтной DC шины позволяет без затрат на преобразования подмешивать энергию из городской сети или бензо/дизельного генератора при нехватке ветро/солнечной генерации не расходуя заряд аккумуляторов.

### IV. СИЛОВЫЕ УЗЛЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

В основе работы силовых узлов лежат импульсные преобразователи напряжения использующие ШИМ-генератор, который, подавая импульсы определенной частоты на управляющий транзистор, управляет напряжением на выходе. Выходное напряжение зависит от ширины подаваемых генератором импульсов и таким образом регулируется. Импульсные преобразователи хороши тем, что имеют высокий КПД. Еще одно достоинство импульсных преобразователей – это широкий диапазон входных напряжений. При этом, входное напряжение может быть ниже выходного или намного выше [14].

Для преобразования напряжения обычно предлагается использовать схему одно индукторного четырёх транзисторного понижающего-повышающего (single inductor four-switch Buck-Boost, FSBB) DC-DC устройства (рис. 3) [15].

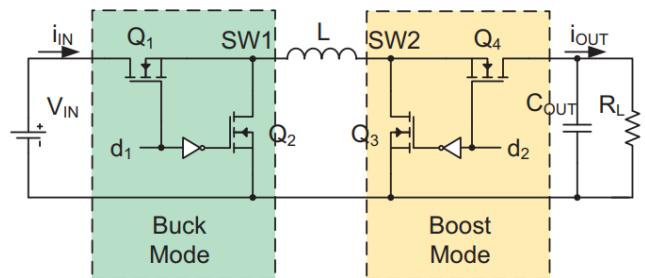


Рис. 3. Схема FSBB преобразователя напряжения

Использование такой схемы позволяет производить контроль нагрузки на общую линию питания и не требует согласования напряжений на широком промежутке. При этом наличие такого DC-DC преобразователя обязательно должно быть на каждом генерирующем и аккумулирующем устройстве, что значительно повышает стоимость конечного оборудования.

В улучшенном предложенном варианте с двумя независимыми DC линиями, достаточно использовать повышающий преобразователь на каждый генератор энергии и понижающий для зарядки аккумуляторов. Т.к. преобразователи могут работать в двух режимах, то можно

заметить, что у каждого из них имеется ряд особенностей. При синхронном преобразовании ток, проходящий через индуктор постоянный, при этом отсутствует падение напряжения в выпрямительном диоде, блокирующем обратный ток, который возникает при размагничивании силового дросселя, отсутствующий в асинхронном режиме.

Чтобы воспользоваться эффективностью синхронного режима, предлагается совместить оба режима и действовать их в зависимости от нагрузки на блок DC-DC, при которой переход в режим асинхронной работы будет осуществляться при низком токе индуктора способном вызвать обратное течение. В таком режиме падение эффективности при действовании выпрямительного диода будет незначительной. Использование мультифазного режима позволит повысить КПД преобразователя на большом участке токов за счёт удержания индивидуальной нагрузки на заданном интервале для каждой фазы с помощью подключения дополнительных фаз при повышении общей нагрузки, дополнительно уменьшив габаритные размеры силовых компонентов.

## V. СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ

Основной задачей при получении энергии с использованием альтернативных источников, является наибольшая выработка энергии из генераторов при любых доступных условиях. При этом получаемая из них мощность должна сразу расходоваться потребителем, а также запасаться в аккумуляторах для использования в моменты слабой генерации. На рис. 4 показана схема гибридной электростанции собранной с учётом улучшений и возможностью масштабирования и расширения.

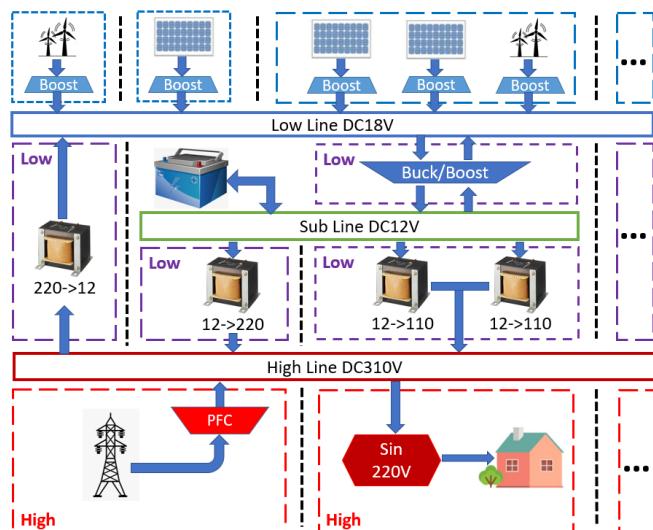


Рис. 4. Схема гибридной электростанции с двумя независимыми DC линиями

При таком подходе некоторой особенностью начинает обладать преобразователь напряжения (Buck) подключённый от низковольтной DC линии (Low Line) к аккумуляторной батарее (Sub Line) используемый в качестве зарядного устройства. Это позволяет при необходимости использовать его в качестве повышающего преобразователя (Boost), когда требуется повысить мощность низковольтной линии, например для подзарядки дополнительных аккумуляторов, если генерация

от альтернативных источников отсутствовала долгое время, чтобы продлить их срок службы в автономных условиях.

Благодаря использованию независимой высоковольтной линии (High Line) появляется возможность задействовать несколько разных потребительских линий. А также устройство коррекции фактора мощности (power factor correction, PFC) дополнительно подмешивает напряжение из дизельного электрогенератора и/или городской линии электропередачи в момент, когда выработка альтернативных источников генерации недостаточна для нормального питания потребительских устройств, а энергия запасённая в аккумуляторных батареях отсутствует, либо сохранена для экстренного случая.

Дополнительный трансформатор, поддерживающий высоковольтную DC линию, выступает в качестве дежурного источника питания и используется в момент, когда потребительская нагрузка мала, либо вовсе отсутствует. Это необходимо для отключения мощных трансформаторов, чтобы избежать их работы в холостом режиме, при котором они расходуют лишнюю энергию. При необходимости существует возможность перенаправить энергию из высоковольтной линии в низковольтную для зарядки аккумуляторов от сети, получив таким образом режим бесперебойного источника питания.

Структура электростанции, собранная по данной схеме, позволяет добавлять необходимое количество элементов: источников генерации альтернативной энергии, аккумуляторных батарей разной емкости и мощности, потребителей энергии, а также дополнительные устройства фильтрации, мониторинга и синхронизации (рис. 5).

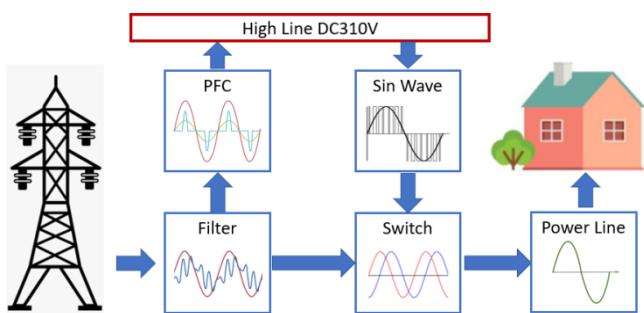


Рис. 5. Дополнительные устройства фильтрации, мониторинга и синхронизации

Отслеживание режима и качества расходования электроэнергии потребителем позволяет организовать правильную структуру электростанции и распределить нагрузку между силовыми компонентами с учетом предсказанного поведения на основе анализа потребления в заданном промежутке времени.

## VI. СТРУКТУРА УПРАВЛЕНИЯ КОМПОНЕНТАМИ

Для организации гибридной электростанции с возможностью масштабирования и расширения требуется управляющая система на основе распределённых микроконтроллерных узлов для каждого подключенного устройства. Модель управления такой системой должна быть иерархической, т.к. в распределении нагрузки уча-

ствуют все устройства одновременно и требуют постоянной балансировки и отслеживания состояния. На рис. 6 показана логическая схема подключения управляющих микроконтроллеров с разделением сигнальных шин на низковольтную (Low bus) и высоковольтную (High bus).

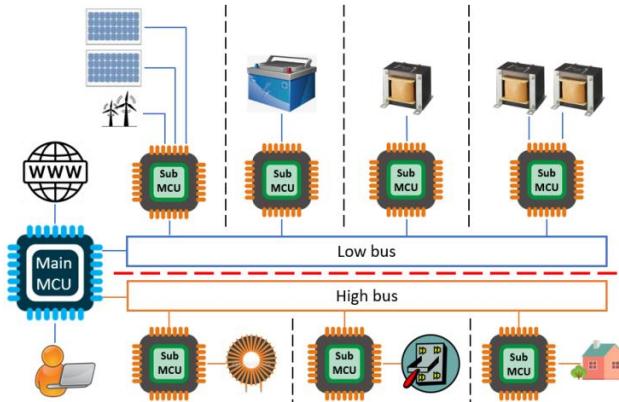


Рис. 6. Логическая схема подключения управляющих микроконтроллеров

Система управления электростанцией может осуществлять распределение энергии не только получая информацию о текущей выработки генераторов, но и использовать данные о прогнозе будущих погодных условий, чтобы сохранить запас заряда в аккумуляторных батареях в случае неблагоприятных событий. При этом основным потребителем электроэнергии является человек, а его деятельность не бывает всегда постоянной, то задействовав интеллектуальную систему контроля, анализа и управления, можно спрогнозировать параметры и режим работы электростанции, с учетом заданных пользовательских настроек. Это позволит эффективно использовать имеющийся запас емкости аккумуляторных батарей, а также продлить срок их службы. При наличии подключения к источнику городской электросети можно сэкономить на потреблении платной электроэнергии передавая в сеть излишки генерируемой мощности альтернативными источниками.

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были показаны основные существующие способы генерации, преобразования, хранения и передачи потребителю электроэнергии, полученной из альтернативных источников. Анализ данных методов выявил ряд недостатков, снижающих выработку полезной мощности. Использование сложных и дорогостоящих преобразователей напряжения DC-DC существенно повлияло на конечную стоимость силовых узлов электростанции. Были предложены изменения и доработки, позволяющие избавится от большинства негативных факторов влияющих на снижение КПД всей установки, а также показаны способы значительно уменьшающие затраты на производство основных компонентов. Интеллектуальная система анализа, планирования и управления распределением мощности дополнительно позволяет сэкономить на оборудовании, позволяя использовать уже установленные компоненты более эффективно. Расширяемость и масштаби-

руемость предложенной структуры электростанции положительно влияет на её выбор относительно рассмотренных ранее образцов. Себестоимость изделия при такой компоновке также сильно снижается.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Обухов С.Г., Ибрагим А. Анализ режимов и выбор параметров преобразователя напряжения и контроллера максимальной мощности автономной фотоэлектрической станции // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24, № 1. – С. 165.
2. Бельский А.А., Концева А.В., Добуш В.С., Старшая В.В. Моделирование электротехнического комплекса с питанием от ветро- или фотоэлектрической установки // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – Вып. 2. – С. 538-539.
3. Пионкевич В.А. Аспекты практического применения солнечных установок для электроснабжения промышленных и сельскохозяйственных потребителей // Вестник ИрГТУ. – 2016. – № 5 (112). – С. 130.
4. Мухамбетьяров Б.Б., Лукичев Д.В., Полюга Н.Л. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18, № 6. – С. 1100.
5. Хомутов С.О., Пилицук В.И., Сташко В.И. Исследование основных режимов работы и элементов конструкции фотоэлектрических систем для построения микромощной солнечной электростанции // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 1. – С. 153-154.
6. Фёдоров А.Ю., Левицков А.В. Моделирование силового инвертора для фотоэлектрических систем // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). – 2016. – № 1 (22), – С. 150.
7. Малинин Г.В., Серебрянников А.В. Сложение за точкой максимальной мощности солнечной батареи // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 76-77.
8. Энгель Е.А., Энгель Н.Е. Интеллектуальная система сложения за точкой максимальной мощности фотоэлектрического массива // Вестник кибернетики. – 2020. – № 4 (40). – С. 22.
9. Русскин В.А., Семёнов С.М., Диксон Р.К. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышающего преобразователя напряжения солнечного инвертора // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 4. – С. 78-79.
10. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Кузьменко А.А., Погорелов М.Е., Кондратьев И.В. Синергетические методы управления сложными системами: энергетические системы / под общей редакцией А.А. Колесникова. – М.: URSS, 2019. – 248 с.
11. Kolesnikov A., Veselov G., Kolesnikov Al., Kuzmenko A., Popov A., Dougall R., Kondratiev I. A Synergetic Approach to the Computer Modeling of Power Systems // The 7th Workshop on Comput-ers in Power Electronics. July 16-18, 2000 Blacksburg, Vir-ginia. Proceeding. – P. 251-254.
12. Шерьязов С.К., Исенов С.С., Исаков Р.М., Кайдар А.Б. Основные типы ветротурбин-генераторов в системе электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 5. – С. 30.
13. Обухов С.Г., Плотников И.А., Ибрагим Ахмед, Масолов В.Г. Двухконтурный накопитель энергии для гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 1. – С. 66.
14. Михеенко А.Е. Импульсные DC-DC преобразователи // Международный научный журнал «Science Time». – 2017. – № 1. – С. 287.
15. Wei-zhong Zhang, Hui-pin Lin, Yao Zhang, Ji-min Jin. Modeling and Controlling Strategy of Four-Switch Buck-boost Convertor with Smooth Mode Transitions // The Open Electrical & Electronic Engineering Journa., – 2017. – 11. – С. 57.

# Разработка новых систем управления на 1м телескопе Цейсс-1000

**Комаров Владимир Владимирович**  
 Участок инженерного обеспечения  
 наблюдений СЭК БТА  
 Специальная астрофизическая  
 обсерватория Российской  
 академии наук  
 пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия  
*komarov@sao.ru*

**Шергин Владимир Сергеевич**  
 лаборатория информатики  
 Специальная астрофизическая  
 обсерватория Российской  
 академии наук  
 пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия

**Драбек Сергей Витальевич**  
 Лаборатория физики оптических  
 транзиентов  
 Специальная астрофизическая  
 обсерватория Российской  
 академии наук  
 пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия

**Фокин Максим Юрьевич**  
 Лаборатория физики оптических  
 транзиентов  
 Специальная астрофизическая  
 обсерватория Российской  
 академии наук  
 пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия

**Емельянов Эдуард Владимирович**  
 Лаборатория физики оптических  
 транзиентов  
 Специальная астрофизическая  
 обсерватория Российской  
 академии наук  
 пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия

9

**Шалдырван Игорь Викторович**  
 Участок инженерного обеспечения  
 наблюдений СЭК БТА  
 Специальная астрофизическая  
 обсерватория Российской  
 академии наук  
 пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия

**Аннотация.** В данной работе приводится описание новых систем управления телескопа Цейсс-1000, которые позволили автоматизировать узел фокусировки телескопа и устройство гидирования. В результате проведенной модернизации наблюдательный комплекс на телескопе стал полностью автоматизированным.

**Abstract.** This paper describes the new Zeiss-1000 telescope control systems, which made it possible to automate the telescope focusing unit and the guiding device. As a result of the modernization, the observation complex on the telescope has become fully automated.

**Ключевые слова:** телескоп, системы управления.

**Keywords:** telescope, control system.

## I. ВВЕДЕНИЕ

На 1м оптическом телескопе Цейсс-1000 САО РАН помимо планово-профилактических работ ведутся многолетние научно-технические исследования, связанные с модернизацией, как самого телескопа, так и наблюдательного комплекса в целом. Некоторые из таких разработок в прошлом году закончились внедрением новых систем управления и мониторинга. В данной статье представлены результаты работы по разработке новых систем управления фокусировочного механизма телескопа Цейсс-1000 и системы 20см гида, которые явились завершающим этапом многолетнего периода работ по автоматизации телескопа Цейсс-1000 [1].

## II. СИСТЕМА 20СМ ГИДА ТЕЛЕСКОПА ЦЕЙСС-1000

Для наблюдений на оптическом телескопе Цейсс-1000 с диаметром главного зеркала 1м конструкторы предусмотрели дополнительные системы наведения и сопровождения исследуемых объектов. Это жестко закрепленные на 1м трубе два дополнительных телескопа

диаметрами зеркал 20см и 9см. Телескоп-рефрактор с линзой 200мм был изначально оснащен окуляром для визуального отождествления звездной площадки наведения телескопа на исследуемый объект с возможностью гидирования по опорным источникам [2].

Первый аналого-цифровой мониторинг звездной площадки, наблюданной в 20см гида Цейсс-1000 был разработан и внедрен в эксплуатацию в 2005 году на базе телевизионной ПЗС камеры VNI-743 производства ООО «ЭВС» (Санкт-петербург) (рис.1). Телевизионный гид Цейсс-1000 был предназначен для отождествления на видео-контрольном устройстве (ВКУ) или дисплее ПК изображений участков звездного неба в поле зрения 8 угловых минут, включающего поле зрения 1 м телескопа. Компьютерное управление параметрами телевизионного подсмотра позволяло получить большой динамический диапазон и высокую чувствительность. ПЗС камера располагалась в подкупольном пространстве телескопа в фокальной плоскости 20см телескопа. Остальное оборудование по приему, обработки видеоизображений, а также по управлению параметрами ПЗС камеры находилось удаленно, в аппаратной Цейсс-1000. Проведенные исследования показали, что проницающая способность в поле 20 см гида достигает 16звездной величины при экспозиции более 5сек, что вполне приемлемо для задач наведения и отождествления в наблюданной площадке.

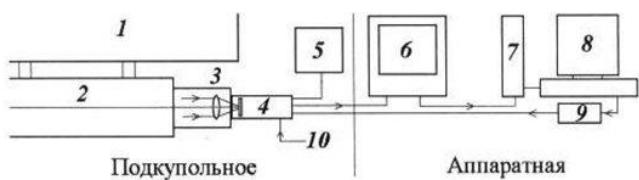


Рис. 1. Аналого-цифровой комплекс мониторинга звездной площадки 20см гида Цейсс-1000

- 1) Труба телескопа Цейсс-1000;
- 2) Труба 20см телескопа-гига;
- 3) Полевая линза, меняющая фокусировку гига;
- 4) ПЗС камера в фокальной плоскости гига;
- 5) Блок питания ПЗС камеры;
- 6) Видео-контрольное устройство;
- 7) Граббер видеоизображения;
- 8) ПК для обработки видео и управления;
- 9) Преобразователь RS-232/RS-485;
- 10) Ручное управление параметрами ПЗС

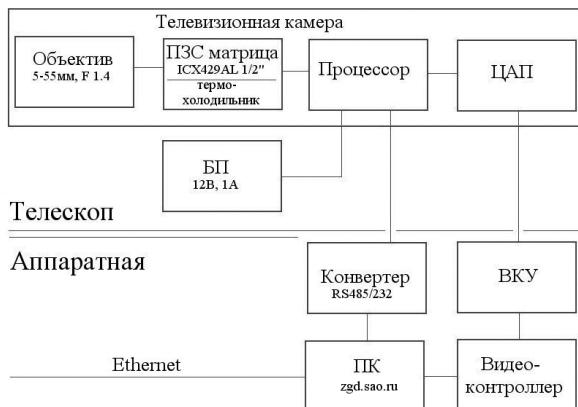


Рис. 2. ПЗС камера VNI-748-H2 и ее подключение

В 2011 году проведена модернизация телевизионного гига на 1м телескопе Цейсс-1000. Предыдущая камера гига выработала ресурс, проработав более 5 лет. Новый подсчет был сконструирован на базе современной камеры VNI-748-H2, имеющей более высокочувствительную ПЗС матрицу [3], с возможностью дистанционного управления ее параметрами по интерфейсу RS-485 (рис. 2). Продуман также режим ручного управления непосредственно кнопками на задней панели самой камеры.

В 2019 году данная камера выработала свой ресурс, и было решено модернизировать 20см гига на базе цифровой ПЗС камеры Atik-414E. В 2021г. проведена модернизация не только приемника, но и оптической системы гига. Проведена юстировка оптической оси 20см гига, которой не проводилось со дня начала работы Цейсс-1000 [4].

Поскольку координатная точность гигов определяется конструкциями телескопов, координатная привязка в FITS файлах оставляла желать лучшего (для БТА до 30°, а для Цейсс-1000 до нескольких минут). Дальнейшее уточнение координат возможно только по объектам в поле. Разрабатывались алгоритмы определения сдвига звездного поля, при этом поворот поля и масштаб считаются уже известными, что позволяет упростить процедуру. Метод определения сдвига корреляционный, с использованием штатной FFT библиотеки Linux. Список объектов для модельного изображения образца получается из каталогов Tycho2 и USNOA2. Опробовано два варианта: с прямым использованием исходного изображения и с предварительным выделением объектов на нем. Сейчас на практике используется второй. На основе этих алгоритмов разработана CGI программа GuideFix.cgi для сравнения изображений с камер гигов с объектами из каталогов (рис. 3). Она получает в параметрах имя FITS файла, считывает параметры шапки и

изображение, составляет список объектов из каталогов, сравнивает его с объектами выделенными на изображении и выдает в ответ смещение звездного поля ( $dX, dY$ ). При этом на диск для использования в Web-презентации (рис. 4) записываются: FITS файл с исправленной (fixed) WCS шапкой, четыре JPEG картинки и JS файл с WCS параметрами и информацией из каталогов. Web-презентация FITS изображений гигов с точной координатной привязкой (fixed WCSheader).

Представляются результаты обработки FITS файлов CGI программой GuideFix.cgi. Можно переключать изображения, определять координаты мышкой, смотреть данные из использованных каталогов. Переходя на новую ПЗС камеру Atik-414E, мы уходим от телевизионных сигналов, имеющих низкую помехоустойчивость, что сильно влияет на качество изображений. Но наличие цифрового выхода USB накладывает ограничения на длину линии связи с компьютером. Для Atik камеры был установлен на трубу телескопа управляющий микрокомпьютер, принимающий цифровые изображения от камеры и передающий их на сервер для дальнейшей обработки изображений. Сравнительные характеристики ПЗС камер, которые были установлены на 20см гига, приведены в табл. 1.

Микрокомпьютер zatik.sao.ru является маломощным с ARMпроцессором, но на нем установлен минимальный Linux с сайтом. Экспозиция задаётся через сайт. Программа камеры работает циклически и после считывания каждого изображения создаёт FITS-файл который доступен через сайт. МО для презентации и Web-интерфейс разрабатывались на сервере БТА tb.sao.ru чтобы обеспечить доступ не только из внутренней сети но и из внешнего Интернета. Разработана специальная программа zatik\_fits\_wcs. Она получает на входе FITS-файл с Atikkамеры и файл ZFITS.HDR с параметрами системы управления Цейсс-1000. Её функции:

- создать корректную FITS-шапку с прототипом WCS-параметров;
- профильтровать изображение, выделить объекты, составить отсортированный по величине список;
- по текущим координатам RA и Decl считать нужную область каталога USNO-UCAC3, привязать (при помощи WCS) к координатам на снимке, составить отсортированный по звёздной величине список;
- выполнить Фурье-корреляцию двух списков для определения смещения;
- если корреляция не получается поменять угол поворота в WCS (в пределах  $\pm 1.5^\circ$ ) и вернуться к привязке каталога к снимку;
- отождествлять объекты из двух списков с учетом полученного смещения;
- по отождествлённым объектам уточнить угол поворота, сформировать окончательные WCS-параметры и посчитать оценку качества (среднеквадратическое отклонение, оценка  $\sigma$ );
- сформировать JPEG-картинки и JavaScript-файл с параметрами для Web-интерфейса презентации;
- вывести окончательный FITS-файл.

Разработан Shell-скрипт `zatik_monitor.sh`. Он запускается при старте системы, следит за состоянием телескопа и микро-компьютера `zatik`, получает через его сайт FITS-файлы Atikkамеры, скачивает файл `ZFITS.HDR` с системы управления и запускает программу `zatik_fits_wcs`. На каждую наблюдательную ночь заводится архивный справочник. В него раз в 10 минут записывается FITS-файл с координатной привязкой. Кроме текущей ночи хранятся ещё 10 последних ночных.

### III. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ФОКУСИРОВКОЙ

У телескопа Цейсс-1000 имеется два вспомогательных (вторичных) зеркала [5]. Одно (рис. 3) перенаправляет лучи от главного зеркала в фокус Кассегрена через отверстие главного зеркала, другое – через систему плоских зеркал в фокус кудэ (рис. 4).

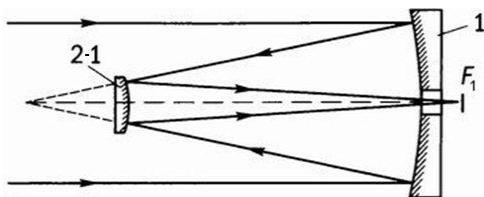


Рис. 3. Вспомогательное зеркало 2-1 перенаправляет лучи через главное зеркало 1 в фокус Кассегрена

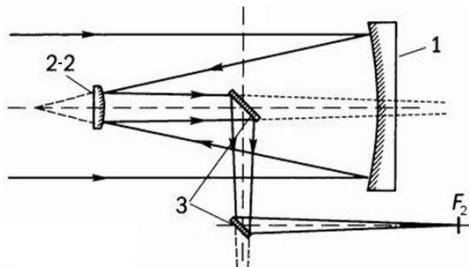


Рис. 4. Вспомогательное зеркало 2-2 перенаправляет лучи через систему плоских зеркал 3 в фокус кудэ

Оба вспомогательных зеркала 2-1 и 2-2 смонтированы на одной опорной передней крестовине тыльными сторонами друг к другу и могут путем переворачивания крестовины на 180 градусов включаться в соответствующую схему хода лучей. Для фокусировки вторичные зеркала перемещаются вдоль оптической оси по беззазорной роликовой направляющей. Перемещение осуществляется дистанционно управляемым электроприводом. Информация о положении фокусирующего устройства в опорной крестовине передается двумя сельсинами грубого и точного отсчетов на пульт управления телескопом. Сельсин-датчик связан электрически с сельсин-индикатором, на валах которого закреплены диски с нанесенными шкалами для визуального контроля положения.

До 2013 года был ручной пульт управления сельсинами. И в этом же году, в основном, заканчивается автоматизация основных систем телескопа с помощью программного управления через SEW-приводы. Для автоматизации фокусировочного узла также разрабатывалась панель управления, но привод не был установлен на телескоп. В 2014-м году в систему добавлено устройство KBX-110. Это блок с 10-ю реле управляемый по TCP. Реле предназначались для временной схемы удаленного ручного управления фокусировкой телескопа. Соответственно было принято временное решение не включать

TCP-связь с KBX в главный сервер, а разработать вместо панели «Focus» временную панель управления реле. Панель сама связывается с TCP-сервером KBX при включении вкладки «Focus» и отключает эту связь при переключении на другую вкладку. К сожалению, затем на свободные реле было подключено управление включением питания: SEW-приводов телескопа, стоек в аппаратной, аппаратуры на трубе телескопа. В результате был разработан новый web-интерфейс наблюдателя, куда вошла и панель управления фокусировкой. Информация грубого и точного значения фокусировки осталась не автоматизированной. Только визуальное восприятие отсчетов шкалы сельсинов. Было принято решение для проведения удаленных наблюдений установить перед шкалами web-камеру, передающую изображение шкалы сельсинов в удаленный доступ в реальном времени. Только к 2020 году появляется возможность установки инверторного привода на узел фокусировки. Разрабатывается новое программное обеспечение с новым web-интерфейсом.

Штатный, изготовленный фирмой Carl Zeiss Jena DDR, электропривод фокусировки на телескопе ZEISS-1000 представлял собой двухмоторную схему с двухвходовым редуктором и ходовым микровинтом, который передавал движение вторичному зеркалу и отсчетному устройству, состоящему из двух сельсин-датчиков связанных между собой механическим редуктором с передаточным отношением 1:100.

Асинхронные трёхфазные электродвигатели, вместе с двухвходовым редуктором обеспечивали возможность изменения положения вторичного зеркала с двумя фиксированными скоростями. Управление двигателями производилось релейной схемой путём нажатия соответствующих кнопок на ручном пульте управления. Контроль за положением вторичного зеркала производился визуально, по шкалам на валах сельсин-приёмников, размещенных в том же пульте.

Не удобство использования такой схемы управления фокусом телескопа заключается в невозможности автоматизации процессов фокусировки и перефокусировки в ходе наблюдений, что приводит к значительным потерям времени и к тому же, по завершению фокусировки, наблюдатель должен вручную вводить отсчеты фокуса в таблицы наблюдательных данных.

Приступая к подготовке проекта модернизации, авторами была сформулирована задача, состоящая из следующих пунктов:

Сделать управление электроприводом по командам от сервера системы управления телескопа.

Обеспечить автоматический режим заполнение информации об отсчетах фокуса в сопроводительную информацию к наблюдательным данным.

Разработать и внедрить в состав работающей системы управления телескопом соответствующие интерфейсы пользователя, позволяющие выполнять функционирование фокусирующего механизма в двух режимах:

- режим непрерывного перемещения, с выбором нескольких скоростей движения;
- режим позиционирования по заданной координате.

Обеспечить максимальную возможную точность позиционирования привода в автоматическом режиме за счет подъезда к заданной координате всегда с одной и той же стороны (движением зеркала в плюс или вверх).

Обеспечить надёжную и безаварийную работу устройства за счёт ограничения максимального тока двигателя, работы программных и физических конечных выключателей с визуальным информированием наблюдателя о включении аппаратных ограничений.

Обеспечить минимальную выделяемую тепловую мощность привода за счет обесточивания исполнительного электродвигателя и применения энкодера с потребляемой мощностью не более 2 ватт.

По итогам проделанной работы, авторы могут с уверенностью сообщить, что все поставленные ими задачи были успешно решены. В результате модернизации были получены следующие результаты (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Параметр	Значение	Примечания
Величина рабочего хода привода	75 мм	75.5 мм (уменьшен за счет программных KB)
Точность позиционирования	<10мкм	Улучшена на 50%
Режим непрерывного движения (4 скорости)	Есть	Было только 2 скорости
Режим позиционирования	Есть	Не было
Режим автоматической записи отсчетов в файл	есть	Не было

С 2020 года разрабатывается новое программное обеспечение с новым web-интерфейсом. Новое окно программного управления механизмом фокусировки занимает в веб-интерфейсе телескопа место старого блока фокусировки (с сельсинами). В состоянии ошибки или при отключенном питании SEW окно деактивировано, а в его заголовке выводится соответствующее сообщение об ошибке.

После включения питания приводов SEW блок активируется. В его верхней части отображается текущее значение фокуса, округленное до сотых долей миллиметра. Следующая строка (“Speed:. . . ”) позволяет выбрать скорость перемещения двигателя (одна из четырех скоростей) для ручного перемещения. При нажатии на кнопку «+» или «-» фокусер перемещается в соответствующем направлении с выбранной скоростью. После отпускания кнопок происходит его останов.

Третья строка содержит органы управления автоматической установкой заданного значения фокусера. Кнопка “Stop” останавливает движение, кнопка “Set” позволяет активировать процесс установки выбранного значения фокуса из поля, находящегося между этими кнопками. Выбор значения можно делать как при помощи «ползунка», так и вводя нужное число с клавиатуры. В случае попытки введения данных, выходящих за возможный диапазон перемещения фокусировочного механизма, открывается диалоговое сообщение ошибки.

Активные в данный момент кнопки подсвечены зеленым цветом, неактивные – красным. Так, во время движения фокусировочного механизма активной становится кнопка “Stop”, а остальные кнопки управления движения остаются неактивными.

Добавлены в информационные файлы формируемые системой управления для программ сбора реальное значение фокуса. По просьбе разработчиков наблюдательной аппаратуры разработан комплект описаний и примеров программирования обращений к TCS Zeiss-1000 на языке Python и в скриптах на Shell-e (для Linux).

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе описаны новые системы управления таких частей 1м телескопа Цейсс-1000, как механизм фокусировки и комплекс 20см вспомогательного телескопа-грида. Модернизацией данных систем завершается большой этап многолетних работ по автоматизации Цейсс-1000. Это позволило астрономам-наблюдателям проводить исследования удаленно, управляя телескопом полностью в автоматическом режиме.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Комаров В.В. Системы мониторинга автоматизированного комплекса оптического телескопа Цейсс-1000 // Сборник трудов 7-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (ССПС-2015). – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 351-357.
2. Комаров В.В., Драбек С.В., Емельянов Э.В., Шергин В.С., Фокин М.Ю. Системы наблюдения 200 мм гида 1 м оптического телескопа Цейсс-1000 САО РАН. // Труды XXVI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М., 2022. – С. 272-274.
3. Комаров В.В., Семенко Е.А. Исследование современных полупрофессиональных ПЗС-камер для работы на оптических телескопах среднего класса // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – Т. 7. – С. 32-46.
4. Drabek S.V., Komarov V.V., Potanin S.A., et al. Study of the quality of the Zeiss-1000 telescope optical system using the Shack-Hartmann wavefront sensor // Astrophysical Bulletin. – 2017. – Vol. 72 (2). – P. 206-216.
5. Komarov V.V., Moskvitin A.S., Bychkov V.D., et al. Zeiss-1000 SAO RAS: Instruments and Methods of Observation // Astrophysical Bulletin. – 2020. – Vol. 75 (4). – P. 486-500.

# 3D мониторинг небесной полусфера в окрестности крупнейшего российского телескопа БТА САО РАН

**Комаров Владимир Владимирович**

Участок инженерного обеспечения  
наблюдений СЭК БТА  
Специальная астрофизическая  
обсерватория Российской академии  
наук  
пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия  
*komarov@sao.ru*

**Фокин Максим Юрьевич**

Лаборатория физики оптических  
транзиентов  
Специальная астрофизическая  
обсерватория Российской академии  
наук  
пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия

**Шалдырван Игорь Викторович**

Участок инженерного обеспечения  
наблюдений СЭК БТА  
Специальная астрофизическая  
обсерватория Российской академии  
наук  
пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия

**Аннотация.** В данной работе приводится описание новой мониторинговой системы, разработанной для наблюдения ночного и дневного неба в окрестности крупнейших российских телескопов САО РАН. Основное отличие от существующих систем состоит в получении 3D изображений звездного неба в реальном времени. Это позволит более детально, а значит и более качественно получать оперативную информацию о состоянии прозрачности атмосферы для принятия решений о возможности наблюдений на оптических телескопах БТА и Цейсс-1000.

**Abstract.** The paper describes a new monitoring system developed to observe the night and daytime sky in the vicinity of the largest Russian telescopes of the SAO RAS. Its main difference from currently existing systems is the acquisition of 3D images of the starry sky in real time. This will make it possible to obtain more detailed, and therefore better quality, operational information on the state of atmospheric transparency for making decisions on the possibility of observations with the BTA and Zeiss-1000 optical telescopes.

**Ключевые слова:** телескоп, прозрачность атмосферы, 3D мониторинг.

**Keywords:** telescope, atmospheric transparency, 3D monitoring.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В Специальной астрофизической обсерватории (САО РАН) разработаны и внедрены в эксплуатацию несколько десятков телевизионных систем ночного видения, которые используются в наблюдательных комплексах телескопов БТА и Цейсс-1000 [1–3].

Кроме того, для проведения удаленных наблюдений разработаны системы мониторинга небесной полусфера в районе верхней научной площадки (ВНП), где располагаются оптические телескопы САО [4–5]. Для того чтобы принимать решения о времени начала наблюдений необходима оперативная информация, как по метеоусловиям, так и по прозрачности атмосферы.

Визуальный контроль неба в районе телескопов ушел в прошлое, так как на крупнейших телескопах БТА и Цейсс-1000 наблюдения с 2000-х годов проводятся в удаленном режиме [6–7]. Первые системы мониторинга ночного неба разрабатывались на основе видиконных

камер и имели возможность видеть в реальном времени звезды до 3 звездной величины. Поле зрения составляло всего лишь 30 градусов [8]. Поэтому приходилось оснащать данные системы громоздким поворотным устройством. Обзор всей небесной полусфера при этом занимал довольно значительное время.

В дальнейшем, на основе ПЗС фотоприемников были разработаны системы «Все небо», что позволило мгновенно оценивать погодную обстановку в районе телескопов [9–10]. Данные системы имели проникающую способность до 6 звездной величины в реальном времени. Недостатком таких систем было сильно искаженное изображение 180 градусного поля зрения и слабое разрешение первых ПЗС матриц. Поэтому для детального оперативного рассмотрения звездных площадок продолжают оставаться актуальными системы с небольшим полем зрения. Но, как было сказано выше, проблема таких камер состоит в отсутствии оперативного обзора всей небесной полусфера. Для получения полной картины всей небесной полусфера здесь необходимо сканировать небо по высоте на 90 градусов и углу места на 360 градусов [11]. Системы небесного мониторинга с малым полем зрения дают более качественное изображение, но при этом обзор всего неба занимает значительное время и для быстрого принятия решения о возможности начала наблюдений такие системы не подходят. Системы «Все небо» дают мгновенное изображение всей небесной полусфера, но позволяют получать изображения неба с гораздо меньшим разрешением, а значит и менее информативны [12], что также влияет на оперативность принятия решений в процессе наблюдений. Поэтому, в настоящее время прорабатывается новый подход к мониторинговым системам, как ночного, так и дневного неба.

В данной работе мы предлагаем новую мониторинговую систему небесной полусфера, которая разрабатывалась авторами для верхней научной площадки (ВНП) САО РАН. Внедрение в эксплуатацию такой системы мониторинга возле оптических телескопов позволит передавать более детальные изображения всего неба с малыми искажениями за счет получения кадров с малой экспозицией и относительно небольшим углом поля зрения. Но дальнейшая пост-обработка полученных данных в квази-реальном времени выдает на выходе панорами-

рованное 3D изображение всей небесной полусфера, что позволит наблюдателям оперативно получать информацию о состоянии неба в окрестности крупнейшего российского телескопа БТА.

## II. Концепция 3D мониторинговой системы

Как было сказано выше, 3D мониторинговая система небесной полусфера является объединением предыдущих двух мониторинговых систем «Все небо», позволяющих получать в реальном времени единое изображение всего неба, но с низким разрешением, и «панорамными» системами, позволяющими сканировать небо с гораздо более детальным получением изображений. Но получение информации по всей небесной полусфере в последнем случае займет значительное время. Поэтому, 3D мониторинговая система небесной полусфера должна иметь такое поле зрения, которое при высоком разрешении получаемых изображений дает минимальное сканирование всего неба для получения конечной информации в квази-реальном времени.

Основой 3D мониторинговой системы по обзору всей небесной полусфера должен быть высокочувствительный датчик изображения с большим форматом фоточувствительной площадки и малым полем зрения для получения изображений с высоким разрешением. Чувствительность фотоприемника должна быть такой, чтобы за относительно короткое время (в нашем случае это единицы секунд) можно было получить изображение всего неба со звездами до 6 звездной величины. Поэтому мы идем на компромисс и выбираем поле зрения не менее  $90^\circ$ , чтобы без потери качества изображений успеть обработать весь кадр неба также за единицы секунд.  $90^\circ$  обзор позволяет сделать минимальное число сканирований для получения изображения всего неба. Сканировать по высоте при поле зрения  $90^\circ$  не нужно. В данном случае осуществляется получение 4 кадров для всего неба практически без потери качества изображений и с минимальными искажениями.

Для такого сканирования разработана система управления поворотным механизмом, которая позволяет с высокой точностью по углу места получать 4 кадра через  $90^\circ$  по горизонту в циклическом режиме. По высоте угол наклона камеры составляет около 45 градусов, чтобы иметь вертикальный обзор от горизонта до зенита.

В каждом цикле 4 полученных изображения (назовем их Север  $0^\circ$ , Восток  $90^\circ$ , Юг  $180^\circ$  и Запад  $270^\circ$ ) подвергаются специальной пост-обработке, позволяющей получить на выходе единое изображение всего неба (панорама). Данное изображение передается на сервер для последующей визуализации на мониторах наблюдателей. Качество получаемой картинки позволяет астроному детально в режиме 3D панорамирования без дополнительного сканирования рассматривать изображение, как всего неба, так и небольших участков. Время цикла не более десятка секунд, что позволяет получать информацию о состоянии всего неба и быстро принимать решения о возможности наблюдений.

## III. ФОТОПРИЕМНИК

Для создания 3D мониторинговой системы небесной полусфера с получением изображений неба, как в дневное, так и ночное время, необходимо иметь высокочув-

ствительное фотоприемное устройство, способное за короткие экспозиции видеть звездное небо. Кроме того, приемник должен иметь большой динамический диапазон, чтобы работать и днем при ярком освещении. Системы ночного и, одновременно, дневного видения разрабатываются в САО РАН и у нас есть большой опыт их создания. До настоящего времени основой таких систем были ПЗС фотоприемники идеально подходящие для таких задач. Но ПЗС фотоприемники, способные решать астрономические задачи [13] изготавливаются в единичных экземплярах и, соответственно, являются очень дорогими изделиями. В последние годы появились в массовом производстве (а значит не сильно дорогие) КМОП фотоприемники, способные решать астрономические задачи. А такие свойства, как минимальное потребление энергии, высокая степень интеграции и размещение на базе чипа дополнительных блоков для обработки изображений, возможность выборочного чтения, а не всей матрицы, как в ПЗС и, конечно же, намного меньшая стоимость, позволяют КМОП технологии уже конкурировать с ПЗС. Мы решили использовать КМОП датчик MT9M034 [14]. Возможности данного датчика изображений удовлетворяют вышеописанным требованиям получения изображений неба, как в ночное, так и дневное время. А его массовое производство имеет преимущество не только в ценовом сегменте, но и возможности выбора чипа с минимальным количеством горячих пикселей.

Камера Datylon T7M [15] представляет собой сверхкомпактное устройство, содержащее датчик изображения и минимальную обвязку для считывания изображений и передачи данных через USB-порт. В самой камере нет никакой обработки изображений. Все управление осуществляется снаружи с помощью компьютера.

Характеристики сенсора приведены в табл. 1. Характеристики камеры, созданной на базе данного фотоприемника, приведены на рис. 1 и в табл. 2.

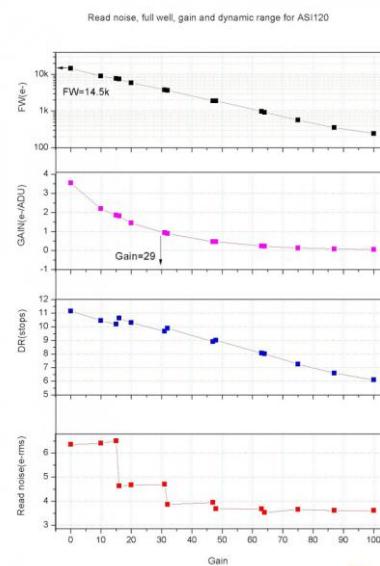


Рис. 1. Графики чувствительности, динамического диапазона и шума считывания в зависимости от усиления камеры

На практике при gain 40 и выше в кадре появляется заметный цифровой шум, а если поднять gain до 60, камера начинает «полоситься». Поэтому наш выбор усиления камеры был в районе 30. (см. рис. 1, график 2).

ТАБЛИЦА 1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Параметр	Значение
Модель	MT9M034 (CMOS)
Размер фотоприемника	Размер фотоприемника
Эффективное разрешение	1280×960 пикселей
Изображение	монохромное
Размер пикселя	3.75×3.75 мкм

ТАБЛИЦА 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРИЕМНИКА

Параметр	Значение
Считывание изображения	прогрессивное
Затвор	электронный
Время экспозиции	от 20 микросек до 1 минуты
Чувствительность	2.7 люкс для монохромного источника света с длиной волны 550нм
АЦП	12 бит
Программная поддержка	все версии Windows, начиная с Windows 98; MacOS, Linux
Интерфейс подключения к компьютеру	USB 2
Интерфейс подключения к мониторке	ST-4
Форматы сохранения одиночных кадров	BMP, FITS, RAW
Формат сохранения видеороликов	AVI
Разрешение и максимальная частота захвата, кадров в секунду	1280×960: 35к/с 1280×720: 46к/с 1280×600: 55к/с 1280×400: 80к/с 960×960: 46к/с 1024×768: 54к/с 1024×600: 69к/с 1024×400: 101к/с 800×800: 66к/с 800×640: 82к/с 800×512: 102к/с 800×400: 108к/с 800×320: 158к/с 640×560: 98к/с 640×480: 113к/с 512×440: 123к/с 512×400: 135к/с 480×320: 165к/с 320×240: 215к/с
биндинг 2×2	640×480: 35к/с
Рабочая температура	от -5°C до +60°C
Рабочая влажность (относительная)	от 20% до 80%
Потребляемая мощность:	менее 0.5Вт

Объектив на камере установлен с углом поля зрения 125 градусов, чтобы при получении 4-х кадров (Север, Восток, Юг и Запад) можно было спшить изображение всего неба с минимальными искажениями.

#### IV. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА РАБОТЫ 3D МОНИТОРИНГОВОЙ СИСТЕМЫ ОБЗОРА ДНЕВНОГО И НОЧНОГО НЕБА

Структурная схема работы системы 3D мониторинга небесной полусфера представлена на рис. 2.

«Сердцем» данного устройства является одноплатный компьютер OrangePIZero, он выполняет:

- считывание изображения с камеры;
- предварительную обработку изображения и дальнейшую отправку на FTPсервер;

- управление шаговым двигателем;
- выбор направления движения;
- опрос концевых выключателей;
- получение информации с датчика температуры и расчёт точки росы;
- включение подогрева при приближении к точке росы.

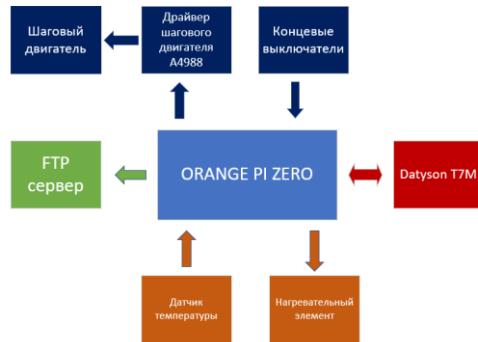


Рис. 2. Структурная схема работы системы 3D мониторинга

На Orange Pi Zero установлены сетевой контроллер Ethernet 10/100 с разъемом для кабеля и адаптер Wi-Fi 802.11b/g/n с внешней антенной. На плате имеются порты USB 2.0 и microUSB 2.0, через который осуществляется питание, но его получится подключить и через GPIO и PoE. Есть GPIO на 26 pin и дополнительный 13-pin. Последний позволяет подключать переходник на 2 USB-выхода, адаптер для монитора, наушники и микрофон. К одноплатному компьютеру подключена камера Datyson T7M с датчиком изображения MT9M034 (CMOS), описанные в предыдущей главе.

Для поворота камеры на заданный угол используется шаговый двигатель NEMA-17. Управление двигателем осуществляется с использованием драйвера шагового двигателя A4988. Для определения угла поворота камеры используется два концевых выключателя основанных на эффекте Холла, максимальный угол поворота камеры 270°.

Датчик температуры и влажности DHT11 – необходим для контроля влажности под куполом камеры. Основная задача состоит в том, что нельзя допускать приближение к точке росы и выпадению конденсата. В случае приближения к точке росы включается дополнительный подогрев и вентиляция подкупольного пространства.

#### V. МЕТОД ПАНОРАМИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВСЕЙ НЕБЕСНОЙ ПОЛУСФЕРЫ

Был рассмотрен метод, позволяющий объединить достоинства и устраниТЬ недостатки предыдущих мониторинговых систем. Метод сложения в панораму нескольких изображений, полученных в максимально короткий отрезок времени с фиксированным положением камеры на поворотном устройстве в единое изображение всей небесной полусфера, а также в 3D-панораму всего неба. С помощью управления поворотным устройством камеры мы получаем четыре изображения с позиционированием камеры Datyson T7M по четырем положениям – Север 0°, Восток 90°, Юг 180° и Запад 270° по азимуту и 45° по углу места для всех четырех положений азимута

та. Объектив данной камеры имеет поле зрения  $125^\circ$ . Это дает возможность четыремя изображениями, полученными через  $90^\circ$  по горизонту перекрыть всю небесную полусферу.

Данный метод позволяет:

1. Уменьшить искажения изображения относительно визуально наблюдаемой картины (минимальное искажение, в отличие от первого метода, в данном методе получается не в одной точке, а в четырех, по количеству получаемых изображений, а при построении 3D-панорамы искажения изображения максимально нивелируются);

2. Увеличить качество изображения для используемой пары камера/объектив при получении четырех изображений небесной полусфера, что позволяет получить увеличение разрешения изображения по формуле:

$$P_{AS} = (P_{F1} + P_{F2} + P_{F3} + P_{F4}) - (P_{S(1:2)} + P_{S(2:3)} + P_{S(3:4)} + P_{S(4:1)}), \quad (1)$$

где

$P_{AS}$  – разрешение поля All Sky;

$P_{F1} \dots F4$  – разрешения полей фрагментов небесной сферы;

$P_S$  – область перекрытия кадров при панорамировании (Stitching).

Таким образом, данный метод позволяет строить панораму всей небесной полусфера за относительно короткий промежуток времени с использованием одной камеры с небольшим полем зрения с сохранением высокого качества получаемых изображений.

Для объединения изображений в панораму предпочтение было отдано методике, разработанной профессором физики и математики Гельмутом Дершем (Prof. Dr. H. Dersch - HFU Furtwangen), и описанной им в свободно распространяемом наборе утилит и библиотек PanoTools (также PanoTools) [16].

Уникальность PanoTools заключается в том, что в отличие от иных программ, которые склеивают панорамы, основываясь на контурах, данный фреймворк трансформирует исходные изображения целиком так, чтобы минимизировать различие в изображениях, параллельно исправляя дисторсию и искажения перспективы. На рис. 3. показан схематически этап подготовки к панорамированию изображения в данном наборе утилит.

### Image Transformations

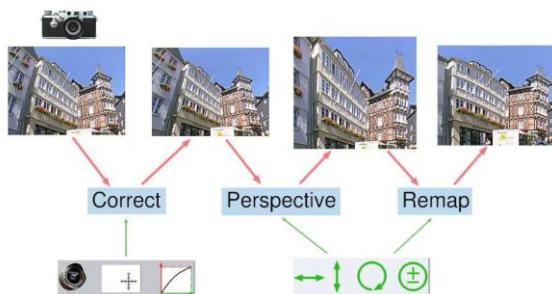


Рис. 3. Алгоритм подготовки к панорамированию изображения в данном наборе утилит

На рис. 4 показан этап коррекции дисторсии в данном наборе утилит.

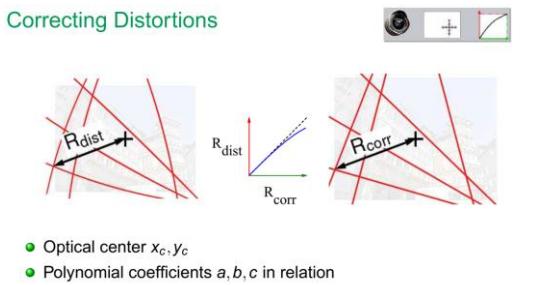


Рис. 4. Алгоритм коррекции дисторсии в данном наборе утилит

На рис. 5 показан этап исправления искажений перспективы в данном наборе утилит.

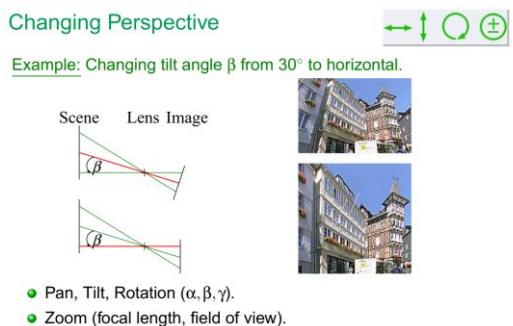


Рис. 5. Алгоритм исправления искажений перспективы в данном наборе утилит

На рис. 6 схематически показан этап работы панорамирования в данном наборе утилит.

### PTStitcher - Single Step Transformation

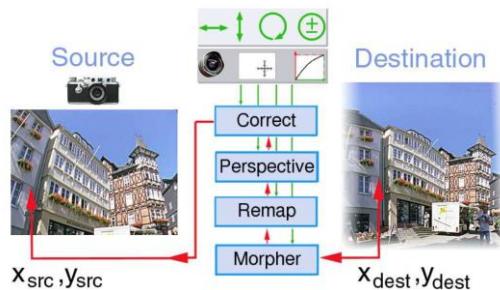


Рис. 6. Алгоритм работы панорамирования в данном наборе утилит

Так как PanoTools является, по сути, только движком по обработке изображений и не имеет графического интерфейса, для автоматизации панорамирования изображений было использовано свободно распространяемое кросс-платформенное приложение Hugin [17]. Данное приложение базируется на методике PanoTools. Hugin [18]. Оно позволяет не только автоматизировать процесс сшивания панорамных фотографий, но и вручную гибко устанавливать параметры или изменять их. А это позволяет перед автоматизацией процесса панорамирования добиться минимизации потерь разрешения изображения всего неба за счет уменьшения областей перекрытия кадров при панорамировании  $P_S$  из формулы (1).

Этот метод приводит нас к возможности на основе полученной панорамы формировать не только изображение всей небесной полусфера, но и при помощи различных свободно распространяемых средств формировать подготовленную в HTML формате 3D-панораму небесной полусфера с нивелированными искажениями изображения. А это позволяет при просмотре данной панорамы визуально более точно оценивать состояние атмосферы для проведения астрономических исследований.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами предложена новая разработка мониторинговых систем «Все небо». В отличие от предыдущих комплексов обзора неба данная модель позволяет получать в реальном времени единое качественное изображение всей небесной полусфера с высоким разрешением. Примененный метод панорамирования для получения изображений всего неба, как ночью, так и днем дает возможность наблюдателю осуществлять 3D мониторинг всей небесной полусфера за минимально короткое время, что необходимо для принятия решений о возможности проведения наблюдений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Витковский В.В., Комаров В.В. Наблюдательные системы больших оптических телескопов // Материалы международной научной конференции “Математическая физика и ее приложения” (МФП-2012). Т. 1. – Пятигорск, 2012. – С.42-47.
2. Комаров В.В., Першин И.М. Границевые условия наблюдательных систем больших оптических телескопов // Материалы международной научной конференции “Математическая физика и ее приложения” (МФП-2012). Т. 1. – Пятигорск, 2012., – С.48-56.
3. Komarov V.V., Moskvitin A.S., Bychkov V.D., et al. Zeiss-1000 SAO RAS: Instruments and Methods of Observation // Astrophysical Bulletin. – 2020. – Vol. 75 (4). – P.486-500.
4. Комаров В.В., Фоменко А.Ф. В.С.Шергин. ТВ-система «Все небо» для мониторинга ночной облачности // Прикладная физика. – 2007. – № 5. – С. 130-134.
5. Комаров В.В., Емельянов Э.В., Шергин В.С. Система «Все небо» с круглосуточным мониторингом небесной полусфера. // Материалы XXV-ой международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М., 2018 . – С. 555-557.
6. Vitkovskij V., Chernenkov V., Ivanov A., Gurin V., Kalinina N., Komarov V., Moiseev S., Nazarenko A., Shergin V., Zhelenkova O. The remote access system for the largest Russian Telescopes BTA and RATAN-600 // Baltic Astronomy. – 2000. – Vol. 9, No. 4. – P.527-531.
7. Komarov V.V., Vitkovskij V.V., Fomenko A.F., Shergin V.S. Inside/Outside dome monitoring video system of the 6m optical telescope BTA // Bull. Spec. Astrophys. Obs. – 2002. – 54. – P. 134-139.
8. Комаров В.В. История развития оптико-телевизионных систем 6-м оптического телескопа БТА // Научно-практическая конференция “Оптико-электронные комплексы наземного и космического базирования”: Тезисы докладов. – Лыткарино, 2014. – С. 93.
9. Комаров В.В. Фотоприемные устройства 1м оптического телескопа САО РАН // Труды XXIV Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М., 2016. – С.448-451.
10. Москвитин А.С., Комаров В.В., Комарова В.Н., Емельянов Э.В. Астрономические наблюдения на 1м оптическом телескопе ЦЕЙСС-1000 САО РАН // Системный синтез и прикладная синергетика : Сборник научных работ IX Всероссийской научной конференции, Нижний Архыз, 24-27 сентября 2019 года. – Нижний Архыз, 2019. – С. 170-175.
11. Комаров В.В., Емельянов Э.В., Шергин В.С., Фокин М.Ю. Системы обзора ночного неба в окрестности крупнейшего российского телескопа БТА САО РАН // Труды XXVI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М., 2022. – С. 269-271.
12. Комаров В.В. Синтез телевизионных наблюдательных систем на примере телескопов БТА и Цейсс-1000 // Материалы V Международной научной конференции “Системный синтез и прикладная синергетика”: Сборник научных трудов. Т. III. – Пятигорск, 2013. – С. 72-77.
13. Комаров В.В., Семенко Е.А. Исследование современных полупрофессиональных ПЗС-камер для работы на оптических телескопах среднего класса // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – Т. 7. – С. 32-46.
14. MT9M034 - 1/3-Inch CMOS Digital Image Sensor (datasheet). – URL: <http://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mt9m034-d.pdf>.
15. Datyson T7M (аналог ASI120MM Mini (mono) ZWO Company. – URL: <http://astronomy-imaging-camera.com/product/asi120mm-mini-mono>.
16. Panorama Tools – Open Source Software for Immersive Imaging Prof. Helmut Dersch. – URL: <http://webuser.hs-furtwangen.de/~dersch/IVRPA Berkeley 2007 Conference..>
17. Hugin – Panorama photo stitcher . – URL: <https://hugin.sourceforge.io>
18. Официальный сайт Panorama Tools. – URL: <http://panotools.sourceforge.net>.

# Создание высокочувствительных IP камер на основе CMOS матриц для on-line мониторинга ночного неба

**Комаров Владимир Владимирович**  
Участок инженерного обеспечения  
наблюдений СЭК БТА  
Специальная астрофизическая  
обсерватория  
Российской академии наук  
пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия  
*komarov@sao.ru*

**Шалдырван Игорь Викторович**  
Участок инженерного обеспечения  
наблюдений СЭК БТА  
Специальная астрофизическая  
обсерватория  
Российской академии наук  
пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия

**Фокин Максим Юрьевич**  
Лаборатория физики оптических  
транзиентов  
Специальная астрофизическая  
обсерватория  
Российской академии наук  
пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия

**Аннотация.** В данной работе описываются новые системы мониторинга, разрабатываемые в САО РАН для наблюдения ночного неба в режиме реального времени. В качестве фотоприемника предлагается использовать новейшие IP-камеры с CMOS-датчиками изображения, которые в последнее время по ряду параметров не уступают CCD-матрицам. Разрабатываемые новые модели сравниваются с теми, которые уже работают на телескопах БТА и Цейсс-1000.

**Abstract.** This paper describes the new monitoring systems being developed at the SAO RAS for real-time observations of the night sky. As a photodetector, it is proposed to use the latest IP cameras with CMOS image sensors, which recently are not inferior to CCD matrices in a number of parameters. The new models being developed are compared with those already operating on the BTA and Zeiss-1000 telescopes.

**Ключевые слова:** CMOS-матрица, IP-камера, on-line мониторинг.

**Keywords:** CMOS-sensor, IP-camera, on-line monitoring.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Проблеме видеомониторинга от научных камер до охранных систем в САО РАН уже не один десяток лет. 20 лет назад был разработан и внедрен в эксплуатацию на ВНП цифровой телевизионный комплекс БТА и Цейсс-1000, который работает до сих пор при постоянной модернизации [1]. Для этого комплекса мы подбираем высокочувствительные камеры массового производства [2], позволяющие создавать десятки камер для подсмотров научной аппаратуры, гидов телескопов, обзоров ночного неба, подкупольных камер для которых нельзя использовать инфракрасную подсветку.

Первые системы обзора ночного неба разрабатывались на базе I-SIT телевизионных камер. Это были очень габаритные и малочувствительные обзоры неба. При максимальном напряжении на фотокатоде (-10кВ) в безлунную ночь наблюдались звезды до 3-й звездной величины [3]. С развитием CCD камер были разработаны системы ночного обзора неба I-CCD на базе отечественных телевизионных камер. Проникающая способность была увеличена на порядок: до 5-6 звездной величины при увеличении времени экспозиции до 2 секунд [4]. В дальнейшем, телевизионные системы «Все небо» были

modернизированы на базе более высокочувствительных камер, которые позволили видеть звезды до 8 звездной величины. А с учетом программной обработки изображений со сложением кадров – до 9 звездной величины [5]. То есть проникающая способность была увеличена еще более чем на порядок.

В настоящее время мы исследуем фотоприемники на базе CMOS матриц с целью их использования в системах мониторинга круглосуточного обзора неба в окрестности крупнейшего российского оптического телескопа БТА с диаметром главного зеркала 6м.

В данной работе описываются новые системы мониторинга, разрабатываемые в САО РАН. В качестве фотоприемника предлагается использовать новейшие IP-камеры с CMOS-датчиками изображения, которые в последнее время по ряду параметров не уступают CCD-матрицам.

## II. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ CMOS-ДАТЧИКОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Как известно, долгое время CMOS-датчики по светочувствительности и качеству получаемого изображения не могли конкурировать с CCD-датчиками, и их применение находилось в основном в области систем охранного видеонаблюдения. С 2008 года прогресс в исполнении CMOS-матриц шагнул далеко вперед, и на данный момент применяемые технологии при производстве CMOS-датчиков позволяют конкурировать с CCD-датчиками. Приведем данные технологии:

Exmor – выполняет аналогово-цифровое преобразование сигналов на кристалле и двухступенчатое шумопонижение параллельно на каждом столбце CMOS.

Back-illuminated (BI) – технология обратной засветки матрицы, при которой сетка проводников расположена с тыльной стороны фотоэлементов, а не спереди, что позволяет значительно повысить светочувствительность датчика [6].

Global Shutter – технология регистрации всего изображения одновременно, перекрывая осевой и наклонные пучки объектива синхронно, что позволяет, в отличии от rolling shutter, избежать искажения формы быстро

движущегося объекта при получении изображения. Данная технология ранее была представлена в CCD-датчиках, теперь также и в CMOS [7].

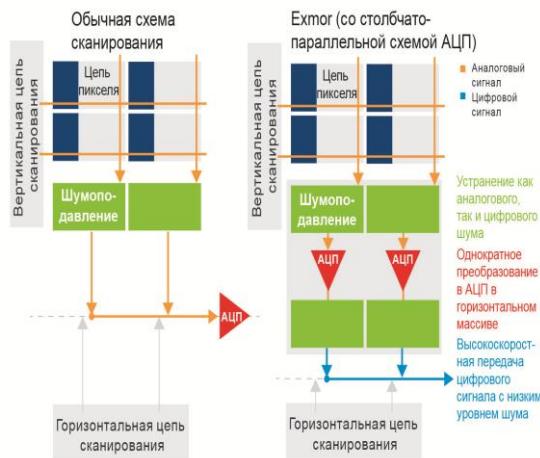


Рис. 1. Схематическое изображение CMOS-датчика с применением технологии Exmor в сравнении с обычным CMOS-датчиком

Pixel Binning readout – или пиксельный биннинг – процесс, при котором полученные из нескольких соседних пикселей матрицы данные объединяются в один. Ранее считалось, что речь идет только про условные квадраты размером  $2 \times 2$  точки, но сегодня используется и формат  $3 \times 3$  – такой, к примеру, применяется в Samsung Galaxy S21 Ultra. В последнем, таким образом из отдельных пикселей размером 0,8 микрона получается квадрат на 2,4 микрона.

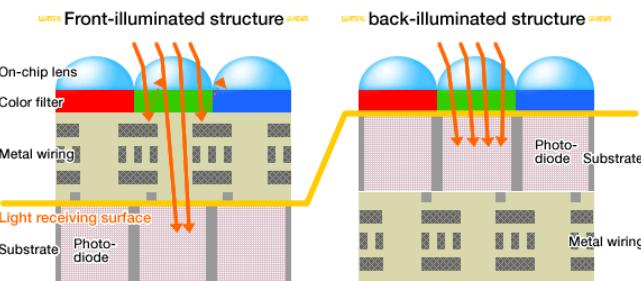


Рис. 2. Схематическое изображение структуры CMOS-датчика с применением технологии Back-illuminated в сравнении с обычным CMOS-датчиком

Более старый пример – Honor View 20 с камерой на 48 Мп и пиксельным биннингом  $2 \times 2$ : пиксели по 0,9 микрона в его случае преобразуются в квадраты по 1,8 микрона. Данная технология искусственно увеличивает величину пикселей, что повышает светочувствительность датчиков [8].

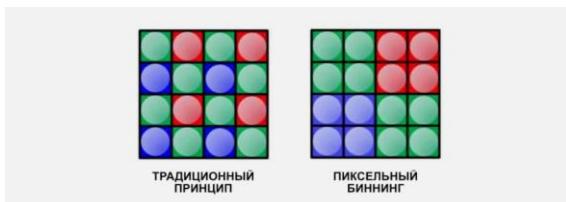


Рис. 3. Схематическое изображение технологии Pixel Binning readout в сравнении с обычным расположением пикселей

Isocell – технология глубокой изоляции пикселей. При данной технологии фотодиоды отделяются стенками, тем самым препятствуя паразитным засветкам соседних пикселей, что приводит к еще большей светочувствительности и уменьшению шумов [9].

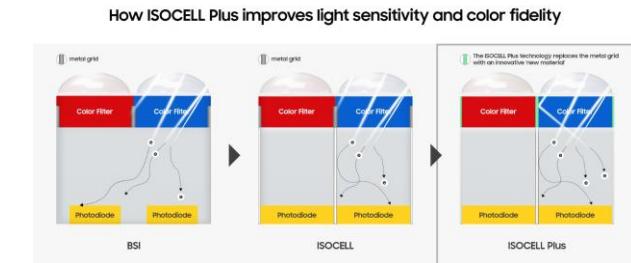


Рис. 4. Схематическое изображение структуры пикселей CMOS-датчиков без применения технологии Isocell, с применением технологии Isocell, и с применением технологии Isocell Plus

### III. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ CMOS И CCD ДАТЧИКОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА НОЧНОГО НЕБА

Для сравнения современных CMOS датчиков изображения с CCD фотоприемниками выберем астрономические камеры фирмы "Andor", приведенное в исследовании сенсоров компанией ООО "Компания "АЗИМУТ ФОТОНИКС"[10]. Камеры, участвовавшие в сравнении, имеют следующие характеристики:

- sCMOS камера с разрешением 5.5 Мп: скорость считывания 560 МГц, 100 кадров в секунду и шум считывания в 1.3 е-.
- CCD камера, Andor Clara с разрешением 1.4 Мп: скорость считывания 20 МГц, 11 кадров в секунду и шум считывания в 5 е-.

Условия формирования изображения при низкой освещенности были созданы с помощью светонепроницаемой установки, оснащенной диффузным, с переменной интенсивностью светодиодным источником света с длиной волны 622 нм, маской (стоящей, как из набора отверстий, так и из таблицы разрешения).

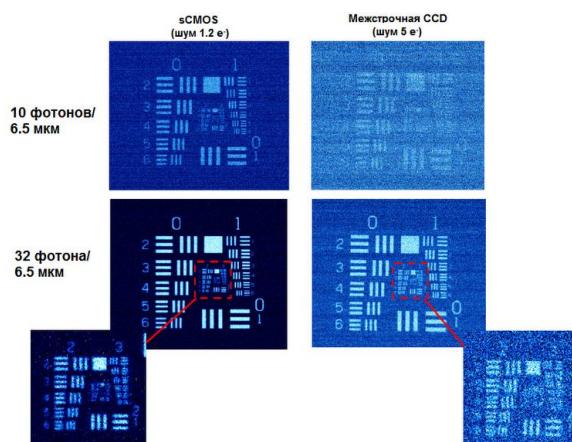


Рис. 5. Сравнение чувствительности научных камер Andor на диаграмме разрешения при низком светодиодном освещении: sCMOS матрица (шум считывания 1.3 е- при скорости считывания 560 МГц) и межстрочная CCD матрица (шум считывания 5 е- при скорости считывания 20 МГц)

Светодиодная установка отлично подходит для сравнения чувствительности при крайне низкой освещенности, используя два параметра низкой интенсивности света: 10 фотонов/6,5 мкм и 32 фотонов/6,5 мкм. Превосходство соотношения сигнал/шум sCMOS камеры над оптимизированной CCD камерой проявляется в виде контраста сигнала над шумом, что так же способствует улучшению разрешающей способности.

Приведенные выше технологии и исследование позволяют признать: CMOS-датчики эффективно использовать в условиях недостаточной освещенности, а это такие работы, как подсмотровые системы оптических трактов (в ситуациях, когда на подсмотровую систему передается небольшой процент от исследуемого светового потока), новые All-Sky камеры для контроля ночного неба в целях своевременного реагирования на изменения погодных условий. (На базе CMOS датчика MT9M034 камеры Datyson T7M разработана система 3D-мониторинга по обзору всей небесной полусфера с применением метода панорамирования. А также на базе CMOS-датчика Sony IMX335 изготовлена и опробована имеющаяся потенциал применения в любительской астрономии All-Sky камера с выводением видеопотока, а не изображений. Характеристики данной камеры представлены ниже.

Физический размер: Диагональ 6,52 мм (тип 1 / 2,8)

Формат 4: 3

Цветовой фильтр: RGB

Технология: Back-illuminated, ГСП

Количество эффективных пикселей: 2616 (В) x 1964 (В) Прибл. 5.14МР

Размер пикселя (H) x (V) 2.0μm x 2.0μm

G чувствительность (тип.) 500mV

Сигнал насыщения датчика (мин.) > 880 мВ (цель)

Максимальная частота кадров (режим прогрессивной развертки) 10 бит: 60 кадров / сек,

12 бит: 30 кадров / сек.

Высокий динамический диапазон (HDR) > Индикация перекрытия DOL HDR (2F 10 бит 30 кадр / с)

(3F 10 бит 15 кадр / с)

Приведем выводы, которые можно сделать из данного сравнительного анализа.

Основными плюсами CMOS-датчиков, по нашему мнению, на данный момент являются:

1) Относительная дешевизна:

в сравнении с CCD-датчиками стоимость на рынке сенсоров приведенной в примере выше матрицы IMX335 с контроллером варьируется в диапазоне 1800–4000 руб.;

2) Простота в использовании:

большинство CMOS-датчиков поставляются с контроллерами, имеющими USB-интерфейс либо Web-интерфейс с подключением к сети Ethernet, т.н. IP-камеры;

3) Широкий спектр производимых датчиков под самые разные нужды.

Как примеры можно привести характеристики 3 датчиков:

**SONY IMX 661-AAQR** – сенсор диагональю 56,73 мм с технологией Global Shutter и Pixel Binning readout:

Разрешение: 13400 x 9528 пикселей (127,68 Мпкс).

Размер пикселя: 3,45um x 3,45um

Динамический диапазон: 0-36dB (шаг в 0,1dB)

Биннинг 2x2.

**SONY IMX 411AQR** – сенсор диагональю 66,7 мм с технологией Back-illuminated, All-pixel readout и Isocell:

Разрешение: 14192 x 10640 пикселей (151 Мпкс).

Размер пикселя: 3,76um x 3,76um

Динамический диапазон: 0-36dB (шаг в 0,1dB)

Биннинг All-pixel.

**SmartSens SC850SL** – сенсор разрешением 8MP с технологиями Back-illuminated, Stack Rolling Shutter, 2nd Gen NIR+.

Разрешение: 3856 x 2176 пикселей (8 Мпкс)

Размер пикселя: 2.0μm x 2.0μm

Чувствительность: 5034mV/Lux·s

Динамический диапазон: HDR Mode - 100dB

Linear Mode - 83dB.

#### IV. СОЗДАНИЕ МОНИТОРИНГОВЫХ СИСТЕМ ОБЗОРА НЕБА НА БАЗЕ CMOS-МАТРИЦ И IP-КАМЕР

Исследования CMOS-датчиков проводились в целях модернизации систем видеонаблюдения и контроля за механизмами на Верхней Научной Площадке (ВНП), что позволило оценить их потенциал и в других областях применения.

Мы заказали и получили две IP-камеры массового производства для замены подкупольных на БТА и Цейсс-1000, которые уже отработали свой ресурс. Но перед этим решили опробовать возможность их работы в качестве системы IP-видеомониторинга охранной системы неохраняемого телескопа Цейсс-1000, который до сих пор не имел охранных видеосистем. И мы хотим предложить САО на примере данной работы создать типовую охранную систему на наших рабочих площадках.

IP-камера фирмы ORIENT модель WF-503 выполнена в корпусе цилиндрической формы, защищенном от влаги и пыли в соответствии со стандартом IP66. Она оборудована матрицей CMOS Silicon Opttronics K05 с разрешением 5 Мп и объективом с фиксированным фокусным расстоянием 3.6 мм (~71°/58°), обеспечивающим съемку детализированного видео. Камера имеет систему обнаружения движения. Реалистичная съемка в темноте возможна благодаря встроенной ИК-подсветке. ORIENT WF-503 подключается проводным и беспроводным способом. В данной модели имеется слот под установку карты памяти.

Данная система IP-видеонаблюдения на телескопе Цейсс-1000 позволяет просматривать изображения, получаемые камерами Orient-WF503 при срабатывании

датчиков движения данных камер, посредством сайта для внутренней локальной сети САО РАН и FTP-сервера для хранения архива изображений и видеозаписей данных камер.

Камеры имеют доступ к настройкам через Web-интерфейс, а также программное обеспечение **SearchTool** и **iVMS-320** (ПК-версию андроид-ориентированного ПО **BitVision**). Также камеры имеют возможность записи изображений и видеозаписи в два потока с характеристиками:

поток 1 – разрешение 2560\*1440, битрейт 4096 kbps,  
поток 2 – разрешение 720\*576, битрейт 512 kbps.

Был создан сайт системы IP-видеонаблюдения для внутрисетевого пользования в САО с локальным адресом <http://remacs.sao.ru>. Так как архив изображений реализован на FTP-сервере, данный сайт корректно отображается в браузере Internet Explorer, и частично корректно в браузерах на базе Chrome ниже версии 80. Архив видеозаписей также реализован на FTP-сервере посредством программного обеспечения iVMS-320.

Для формирования страницы сайта можно воспользоваться различными средствами, в том числе и онлайн-редакторами html, в данном случае было использовано ПО Microsoft Publisher. На странице реализовано отображение новейших по дате создания изображений, сформированных по срабатыванию датчика движения и переданных на FTP-сервер, а также ссылки на архивы изображений (реализованы в виде ссылок на папки FTP-сервера). Для оптимизации быстродействия сайта сложное оформление страницы не применялось. Данную страницу можно изменять и дополнять различными функциями.

Также были заказаны и получены две IP-камеры масштабного производства с повышенной светочувствительностью (технология Back-illuminated), которые в итоге показали хорошие результаты работы без ИК-подсветки в подкупольных БТА и Цейсс-1000. Данные камеры реализованы на датчике CMOS Sony IMX 291 и контроллере Hisilicon HI3516, характеристики данных камер приведены ниже:

Разрешение: 1945 x 1097 пикселей

Размер пикселя: 2.9 $\mu$ m x 2.9 $\mu$ m

Back-illuminated

Динамический диапазон: 0-30дБ (шаг в 0,3дБ)

Объектив фиксированного фокусного расстояния 1.7 мм (~145°/80°)

Датчик движения, поддержка передачи информации по FTP, mail, Onvif, RTSP

Возможна установка слотов расширения под модуль wi-fi или карту памяти.

Получаемые изображения с данных камер также отражены на сайте системы IP-видеонаблюдения, аналогично камерам ORIENT WF-503.

Рассмотрим также пример новой IP-камеры FAD-TEWX-13, которая является еще и высокоскоростной камерой для передовых научных исследований и аэрокосмической отрасли.

Характеристики камеры представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕРЫ FAD-TEWX-13

Параметр	Значение
Разрешение	1280 x 1024 пикселей
Скорость съемки при разрешении 1280 x 1024	13,600 к/с
Динамический диапазон	60 дБ
Аналоговое усиление	1-4
Чувствительность ISO	до 67,000 (монохромная версия); до 23,000 (цветная версия)
Затвор	глобальный (кадровый)
Цветность сенсора	цветной / монохромный
Потребляемая мощность	до 45 Вт
Рабочее напряжение	12 В
Тип объектива	F/K/E/C
ROI	поддерживается
Оптимизация цвета	поддерживается
Превью перед экспортом файлов	поддерживается
Интерфейс передачи данных	GigE
Вход/выход синхронизации	поддерживается
PIV	поддерживается
UPS	поддерживается
Анализ движения	поддерживается
SDK	Поддерживается

Исходя из характеристик данной камеры, можно оценить ее потенциал для исследований особо быстро меняющихся процессов, в том числе и атмосферных флюктуаций, что применимо в АОС.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были представлены в хронологическом порядке новые технологии, применяемые относительно CMOS-датчиков. Приведены примеры современных сенсоров и камер на CMOS-матрицах. Оценен потенциал использования данных сенсоров в системах IP-видеонаблюдения и мониторинговых системах обзора неба. Представлены результаты применения камер на базе светочувствительных CMOS-датчиков, не требующих использования ИК-подсветки.

## ЛИТЕРАТУРА

- Комаров В.В. Синтез телевизионных наблюдательных систем на примере телескопов БТА и Цейсс-1000 // Материалы V Международной научной конференции "Системный синтез и прикладная синергетика": Сборник научных трудов. Т. III. – Пятигорск, 2013. – С. 72-77.
- Комаров В.В., Семенко Е.А. Исследование современных полупрофессиональных CCD-камер для работы на оптических телескопах среднего класса // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – Т. 7. – С. 32-46.
- Комаров В.В., Емельянов Э.В., Шергин В.С., Фокин М.Ю. Системы обзора ночного неба в окрестности крупнейшего российского телескопа БТА САО РАН // Труды XXVI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М., 2022. – С. 269-271.

4. *Москвитин А.С., Комаров В.В., Комарова В.Н., Емельянов Э.В.* Астрономические наблюдения на 1м оптическом телескопе ЦЕИСС-1000 САО // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных работ IX Всероссийской научной конференции, Нижний Архыз, 24–27 сентября 2019 года. – Нижний Архыз, 2019. – С. 170-175.
5. *Komarov V.V., Moskvitin A.S., Bychkov V.D., et al.* Zeiss-1000 SAO RAS: Instruments and Methods of Observation // Astrophysical Bulletin. – 2020. – Vol. 75 (4). – P. 486-500.
6. Sony New Releases: Sony develops back-illuminated CMOS image sensor, realizing high picture quality, nearly twofold sensitivity(\*1) and low noise. – 2008. – URL: <https://www.sony.com/en/SonyInfo/News/Press/200806/08-069E>.
7. Tech Briefs: Sony Pregius Sensors. – 2013. – URL: <https://thinklucid.com/tech-briefs/sony-pregius>.
8. Teledyne Photometrics. Binning. – URL: <https://www.photometrics.com/learn/imaging-topics/binning-2#:~:text=CMOS%20Binning&text=In%20CMOS%20the%20binning%20occurs,for%20that%20resulting%20super%E2%80%91pixel>.
9. Samsung News. Samsung Brings Enhanced Color Accuracy and Sharpness to Mobile Photos with New ISOCELL Plus Technology. – URL: <https://news.samsung.com/global/samsung-brings-enhanced-color-accuracy-and-sharpness-to-mobile-photos-with-new-isocell-plus-technology>.
10. Научные цифровые камеры. Устранения ограничений при использовании научной КМОП камеры (sCMOS). – URL: <https://azimp.ru/articles/tech/38638>.

# Лабораторная установка для исследования свойств оптических волокон

**Юшкун Максим Владимирович**  
Лаборатория астроспектроскопии  
Специальная астрофизическая  
обсерватория РАН  
Нижний Архыз, Россия  
[yutaks@gmail.com](mailto:yutaks@gmail.com)

**Шалдырван Игорь Викторович**  
Участок инженерного обеспечения  
наблюдений СЭК БТА  
Специальная астрофизическая  
обсерватория РАН  
Нижний Архыз, Россия

**Фокин Максим Юрьевич**  
Лаборатория физики оптических  
транзиентов  
Специальная астрофизическая  
обсерватория РАН  
Нижний Архыз, Россия

**Аннотация.** Сообщается о разработке методов исследования качества оптических волокон, используемых в оптоволоконных спектрографах астрофизического применения, а также о создании лабораторного макета в САО РАН для исследования волокон.

**Abstract.** It is reported about the development of methods for studying the quality of optical fibers used in fiber-optic spectrographs of astrophysical applications, as well as the creation of a laboratory stand in the SAO RAS for fiber research.

**Ключевые слова:** оптическое волокно, деградация апертуры.

**Keywords:** optical fiber, aperture degradation.

## I. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени в мире построено множество спектрографов высокого разрешения, имеющих оптоволоконную связь с телескопом, обзор приводится в работе [1]. Оптоволоконное сочетание телескопа и спектрографа позволяет применять крупногабаритные оптико-механические конструкции на телескопах малого и умеренного диаметра. Раньше подобное было возможно только в стационарном фокусе кудэ, но эффективность такой аппаратуры оставляла желать лучшего, да и стоимость телескопа с фокусом кудэ значительно возрастила, поэтому таким фокусом был снабжен не каждый телескоп.

Поскольку выходной торец волокна можно разместить практически в любом месте, чего не скажешь о классической входной щели спектрографа, то стало возможным использовать схему белого зрачка [2], позволяющую использовать эшелле-решетки с большими углами блеска, что приводит к уменьшению габаритов оптики при том же спектральном разрешении. Кроме того, в конструкции, размещенной стационарно, можно увеличить диаметр коллимированного пучка (по сравнению со спектрографами первичного фокуса или фокуса Кассегрена) вплоть до 150–200 мм, что обеспечивает большую широкощельность (в классическом понимании это отношение ширины входной щели к ширине на половине интенсивности аппаратной функции спектрографа), а значит большее спектральное разрешение при большей эффективности. Флуктуации качества изображения, про-

зрачности и неточность гидрования при засветке спектрографа через оптическое волокно в значительной мере проявляются в изменениях освещенности на всей площади зрачка спектрографа. Этот эффект снижает действие зональных ошибок оптики спектрографа, что приводит к более стабильной аппаратной функции и к большей точности позиционных измерений, а также обеспечивает более корректный учет поэлементной неоднородности чувствительности приемника излучения. Таким образом, при одинаковых (по сравнению со щелевым спектрографом) экспозициях обеспечивается более высокая точность измерения лучевых скоростей и более высокое отношение “сигнал/шум”.

При проектировании спектрографа высокого разрешения с оптоволоконным входом необходимо учитывать ряд свойств волокна, которые оказывают существенное влияние на эффективность инструмента в целом.

Во-первых, пропускание оптического волокна в рабочем диапазоне длин волн спектрографа. Развитие технологии изготовления волокон в основном нацелено на применение их в области передачи данных, а значит, важным фактором является пропускание волокна в ближнем ИК-диапазоне: в нескольких окнах от 1260 до 1675 нм. Поглощение сигнала в ближнем ИК-диапазоне обусловлено в основном водой, вернее ионом OH<sup>-</sup>, поэтому технология изготовления связных волокон включает этап «высушивания» заготовки. Однако астрофизические инструменты должны работать в оптическом окне прозрачности земной атмосфера: примерно от 300 до 1000 нм. Поэтому использование связных волокон для сочетания телескопа и спектрографа не всегда бывает оправданным с точки зрения проницающей способности. Обычно считается, что в диапазоне длин волн 400–800 нм при длине волокна до 20–30 метров возможно использование и связных волокон. Приближенно можно считать, что в синих лучах потери на каждые 10 метров оптического волокна эквивалентны потерям на одной алюминированной оптической поверхности (примерно 20%). В красных лучах потери меньше, а в области  $\lambda < 390$  нм потери быстро возрастают по закону  $\lambda^{-4}$ . Таким образом для задач оптической спектроскопии больше подходили бы «мокрые» волокна с высоким содержанием OH<sup>-</sup>, изготовленные по устаревшей технологии. Но все же бум в развитии оптоволоконной техники для задач лабораторных исследований в области

медицины, аналитической химии, материаловедения, а также и астрофизики, происходящий в последние два-три десятилетия, привели к развитию технологии изготовления не только связных, но и специализированных волокон с высоким пропусканием в том числе и в УФ-диапазоне [3].

Также при оптоволоконной передаче света от подвижного телескопа в неподвижный спектрограф часть оптического волокна непрерывно изгибаются. На значительной длине оптоволокна увеличивается вероятность наличия микродефектов. Влияние микроизгибов приводит к снижению пропускания, т.к. часть лучей не испытывает полного внутреннего отражения.

Во-вторых, одно из основных свойств оптического волокна – числовая апертура, определяющая предельный угол раствора конуса лучей, проходящих по ядру волокна без потерь, без выхода в оболочку. Если мы на входной торец подаем пучок лучей с апертурой меньше числовой апертуры волокна, то на выходе мы все равно получим конус лучей с углом раствора, соответствующим числовой апертуре, однако освещен этот конус будет неравномерно. Таким образом в выходящем пучке лучей в той же апертуре, что и апертура входящего в волокно пучка, будет содержаться не весь свет, а какая-то его часть. Причем, какая именно часть, будет зависеть от технологии изготовления, от свойств материала заготовки и режима эксплуатации волокна. Такой эффект называется деградацией апертуры. Исключить потери света за счет деградации апертуры можно только подавая на вход в волокно пучок лучей с апертурой равной числовой апертуре волокна, и на выходе перехватывать пучок с той же апертурой. Но такой способ не всегда бывает оптимальным для изготовления согласующей оптики, иногда это и попросту бывает невозможно сделать с учетом оптической схемы телескопа. Например, мы можем отойти от условия согласования апертур, но при этом получить большее спектральное разрешение при незначительных потерях света. Или для малых телескопов согласование апертуры пучка на входе в оптическое волокно может привести к излишнему попаданию в волокно паразитной засветки.

В-третьих, как уже было отмечено выше, оптическое волокно стабилизирует в значительной степени аппаратную функцию спектрографа, нивелируя ошибки гидирования, в сравнении с классическим щелевым входом. Но для ряда задач такой стабилизации бывает недостаточно. Распределение интенсивности излучения на выходе из волокна зависит от тех же ошибок гидирования: от флуктуаций апертуры входящего пучка, если на входном торце строится сопряженный зрачок телескопа, или от колебаний светового пятна по входному торцу волокна, если на входном торце строится изображение звезды; также распределение интенсивности излучения на выходе из волокна зависит от изгиба волокна при движении телескопа. Изменение заполнения апертуры светового пучка на выходе из волокна будет также приводить к изменению аппаратной функции спектрографа, а следовательно, и к позиционной и фотометрической нестабильности.

Все перечисленные факторы нужно учитывать при создании и эксплуатации спектральной аппаратуры, имеющей оптоволоконный вход. Паспортные значения

параметров оптического волокна являются средними величинами, характерными для того или иного типа волокна. Поэтому если нужно добиться максимальной эффективности оптоволоконного спектрографа, каждое волокно необходимо исследовать отдельно в лабораторных условиях. С этой целью мы разработали определенную методику и создали лабораторный макет для исследования оптических волокон.

## II. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

### A. Исследование пропускания оптического волокна

Кратко суть метода выглядит очень просто: измеряем интенсивность сигнала на входе в волокно, измеряем интенсивность сигнала на выходе из волокна, отношение этих сигналов и будет равно пропусканию. Основная задача заключается в выборе источника (или источников) излучения, в корректном формировании светового пучка на входе в исследуемое оптическое волокно, а также в способе измерения интенсивности сигнала на входе и на выходе.

Исследование пропускания волокна необходимо провести во всем рабочем диапазоне длин волн спектрографа или, по крайней мере, в избранных длинах волн, более или менее равномерно рассредоточенных по рабочему диапазону. С этой целью можно использовать источник непрерывного света с набором узкополосных фильтров, или набор монохромных источников излучения. Мы предлагаем второй вариант, а именно набор полупроводниковых лазеров, обладающих квазимонохромным излучением. Для отработки методики мы использовали три лазера: фиолетовый ( $\lambda=400\text{nm}$ ), зеленый ( $\lambda=532\text{nm}$ ) и красный ( $\lambda=650\text{nm}$ ). Также возможно в качестве источника излучения использовать и светодиоды, имеющие полосу излучения шириной 10–20 нм. Несмотря на то, что полоса излучения у светодиодов шире на порядок, чем у лазера, но светодиод обладает некогерентным излучением, что облегчает анализ изображения светового пятна. Дело в том, что при когерентном источнике на выходе из волокна мы получаем крайне неравномерное распределение интенсивности (спектр-структуре) из-за интерференции, возникающей в многомодовом волокне на изгибах и микродефектах. Если при исследовании пропускания волокна спектр-картина не влияет на точность измерений, так как нас интересует интегральное количество света, вошедшее в волокно и вышедшее из него, то при других видах исследований нас интересует распределение интенсивности в выходной апертуре, и в этом случае спектр-картина является определяющим фактором.

Для того чтобы пропустить пучок света в оптическое волокно необходимо на входном торце построить изображение светящейся диафрагмы, причем размер изображения диафрагмы должен быть меньше диаметра ядра исследуемого волокна, а конус сходящихся лучей должен иметь апертуру не превышающую числовую апертуру волокна. Мы предлагаем для формирования сходящегося пучка лучей использовать фотографический объектив с регулируемой апертурной диафрагмой, а перед этим объективом вместо светящейся диафрагмы разместить вспомогательное оптическое волокно, засвеченное лазерным излучением. Фотографический объек-

тив строит изображение ядра вспомогательного волокна на входном торце исследуемого волокна, причем с уменьшением в два раза. В оптоволоконных спектрографах как правило используются волокна с диаметром ядра 50, 100, 150 и 200 мкм, возможны какие-то промежуточные значения. Поэтому в качестве вспомогательного волокна мы используем обычное связное волокно с диаметром ядра 50 мкм. Конус лучей, выходящих из вспомогательного волокна, ограничивается апертурной диафрагмой объектива и дополнительным экраном вокруг объектива. Таким образом, схема формирования светового пучка на входе исследуемого волокна выглядит следующим образом: лазерное излучение вводится во вспомогательное волокно, на выходе из вспомогательного волокна конус лучей с заведомо большей апертурой обрезается экраном, а та часть, которая попадает в объектив дополнительно диафрагмируется апертурной диафрагмой, таким образом мы исключаем (почти) ошибки измерения, связанные с неравномерным распределением интенсивности излучения по углу на выходе из вспомогательного волокна, т.е. мы используем только центральную часть пучка, где подобные эффекты минимальны; далее объектив строит изображение ядра вспомогательного волокна на входном торце исследуемого волокна, размер этого изображения составляет 25 м км.

Измерение пропускания осуществляется путем последовательной установки в фокусе объектива приемника излучения, регистрирующего изображения торца вспомогательного волокна, и входного торца исследуемого волокна. Приемник излучения и оптоволоконный вход установлены на одной подвижке. При установке входного торца исследуемого волокна в фокус объектива синхронно приемник излучения смешается в место установки оптоволоконного выхода так, что весь пучок света, выходящий из исследуемого волокна, перехватывается этим приемником излучения. Контроль совмещения изображения и ядра исследуемого волокна осуществляется в обратном ходе через тот же объектив при помощи вспомогательного приемника излучения, изображение на который перебрасывается полупрозрачной стеклянной пластиной.

Для измерения пропускания оптического волокна мы получаем последовательно два изображения: изображение вспомогательного волокна и изображение пятна на выходе из исследуемого волокна. Далее интегрируется сигнал на первом и втором изображении. Интегральный сигнал и будет потоком на входе и на выходе из волокна, отношение этих потоков и даст пропускание оптического волокна.

Подобные пары изображений мы получаем с разными лазерами, и таким образом измеряем пропускание на разных длинах волн.

Выше описан метод абсолютных измерений пропускания, в котором мы исходим из соображения, что интегральный сигнал, измеряемый на первом изображении полностью попадает в исследуемое волокно. Если такой уверенности нет, то можно предложить метод относительных измерений, т.е. использовать два волокна различной длины. В этом случае нам понадобится пара изображений только на выходе из первого и второго волокна. Единственно, при этом методе мы должны быть уверены, что входной торец и первого и второго волокна

устанавливаются в фокусе объектива одинаковым образом, и свойства первого и второго волокна идентичны. Первое условие мы контролируем при помощи подсмотра и системы управления подвижкой. Второе условие мы принимаем на веру, используя отрезы волокна из одной катушки. Однако этот тезис можно и проверить, исследуя несколько отрезов волокна одинаковой длины.

Суть метода относительных измерений заключается в следующем. Величину удельного затухания сигнала  $\alpha$ (дБ/м), выраженную в децибелах на метр, в оптическом волокне длиной  $L$ (м) можно записать в следующем виде:

$$\alpha = \frac{10}{L} \lg \frac{F_i}{F_o}, \quad (1)$$

где  $F_i$  и  $F_o$  – соответственно поток на входе в волокно и поток на выходе. Если мы возьмём отрез волокна длиной 1 метр, то в этом случае выражение для величины удельного затухания будет иметь следующий вид:

$$\alpha = 10 \lg \frac{F_i}{F_o}. \quad (2)$$

Если мы принимаем, что величины удельного затухания одинаковы в двух отрезах волокна, то путем нехитрых преобразований можем записать следующее выражение:

$$\alpha = \frac{10}{L-1} \lg \frac{F_o^1}{F_o^L}, \quad (3)$$

где  $F_o^1$  и  $F_o^L$  соответственно величины потоков на выходе из волокна длиной 1 метр и  $L$  метров.

Таким образом в методе относительных измерений на нужны изображения светового пятна на выходе из двух волокон: исследуемого и реперного длиной 1м. Точность измерений в этом случае зависит от точности позиционирования волокон и однородности свойств волокна по длине.

#### B. Исследование деградации апертуры светового пучка в оптическом волокне

На описании способа формирования входного пучка более подробно останавливаться не будем, сразу перейдем к описанию метода исследования деградации апертуры.

Поскольку шакала диафрагм при данной схеме работы фотографического объектива не соответствует реальным значениям апертуры светового пучка, требуется предварительная калибровка. Калибровка значений апертуры светового пучка при изменении диаметра апертурной диафрагмы объектива осуществляется путем получения серии зафокальных изображений при фиксированном положении приемника излучения. Затем в фокус объектива вводится исследуемое оптическое волокно и получаем серию изображений светового пятна на выходе из волокна при фиксированных положениях апертурной диафрагмы объектива.

Измерение распределения энергии по радиусу изображений световых пятен, полученных на выходе, с учетом известного расстояния от выходного торца исследуемого волокна до поверхности приемника излучения, дает информацию об угловом распределении энергии в выходящем световом пучке, что и дает нам информацию о деградации апертуры.

*C. Исследование стабильности заполнения апертуры выходящего из оптического волокна светового пучка*

В отличие от предыдущего метода, при исследовании стабильности заполнения апертуры мы получаем серию изображений световых пятен на выходе из волокна при фиксированной апертурной диафрагме объектива, но при смещении входного торца волокна в фокальной плоскости.

Исследования стабильности заполнения апертуры в этом случае сводится к исследованию изменения двумерного распределения интенсивности сигнала в каждой серии изображений.

### III. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторный макет для исследования оптических волокон сконструирован для решения следующих задач:

- Измерение пропускания оптического волокна на разных длинах волн.
- Исследование деградации апертуры оптического пучка: измерение углового распределения интенсивности излучения на выходе из оптического волокна в зависимости от апертуры входящего в волокно светового пучка.
- Исследование стабильности апертуры выходящего из волокна светового пучка.

За основу мы взяли схему установки, предложенную в работе [4] по исследованию деградации апертуры пучка в оптических волокнах. Изменили способ засветки волокна, способ измерения сигнала, а также перешли на новую элементную базу. На рис. 1 показана принципиальная схема нашей лабораторной установки для исследования оптических волокон. Источником света служат твердотельные лазеры или светодиоды с различными длинами волн излучения. Входной пучок формируется при помощи вспомогательного волокна с диаметром ядра 50 мкм и числовой апертурой 0.22 и объектива Юпитер-9 2/85. Расстояние от выходного торца вспомогательного волокна до объектива выбрано таким, чтобы изображение уменьшалось в два раза, следовательно на входном торце исследуемого волокна строится изображение светящейся диафрагмы размером 25 мкм. Объектив Юпитер-9 снабжен ирисовой диафрагмой, позволяющей менять числовую апертуру входящего в волокно светового пучка от 0.16 до 0.02. Основной приемник излучения – ПЗС-матрица SBIG ST-402. Подсмотр входного торца исследуемого волокна осуществляется при помощи дополнительного детектора на основе КМОП-матрицы Sony IMX 307 и полупрозрачной пластины через объектив Юпитер-9.

#### Характеристики SBIG ST-402:

- Pixel Array-756 x 510 pixels;
- 6.9 x 4.6mm;
- Total Pixels-390,150 ;
- Pixel Size-9 x 9 microns.

#### Характеристики CMOS Sony IMX 307:

- Pixel Array-1920 x 1080 pixels;
- Размер сенсора (диагональ)-6.46 мм / 1/2.8";

- Total Pixels- 2.07 Mp;
- Pixel Size-2.9 x 2.9 microns.

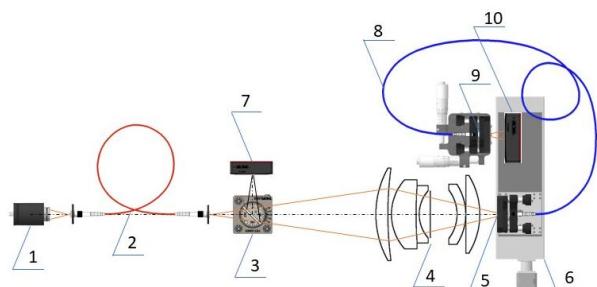


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки. Обозначения: 1 – источник излучения (лазер или светодиод), 2 – вспомогательное оптическое волокно, формирующее светящуюся диафрагму, 3 – полупрозрачная стеклянная пластина, 4 – объектив (Юпитер-9), 5 – оптоволоконный вход, 6 – линейный транслятор, 7 – камера подсмотра входного торца волокна, 8 – исследуемое оптическое волокно, 9 – оптоволоконный выход, 10 – основной приемник излучения

Входной торец исследуемого волокна крепится на линейной направляющей, снабженной электромеханическим приводом, позволяющим осуществлять дистанционное позиционирование волокна (рис. 2). На этой же направляющей основной приемник излучения.



Рис. 2. Передвижная каретка Standa (6) с закрепленными на ней камерой SBIG ST-402 (10) и подвижным креплением входа оптического волокна (5) посредством подвижных юстировочных креплений. Обозначения соответствуют рис. 1

Управление передвижной кареткой Standa реализовано на плате ESP8266, посредством разработанного Web-интерфейса.

Управление камерой подсмотра (Sony IMX307) производится посредством встроенного контроллера Web-интерфейса, управление камерой SBIG ST-402 производится посредством USB-интерфейса и СПО CCDOps.

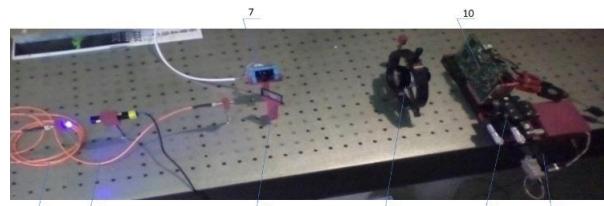


Рис. 3. Лабораторный макет для исследования оптических волокон. Обозначения такие же, как на рис. 1



Рис. 4. Измерительная часть лабораторного макета закрыта светозащитным кожухом. Обозначения такое же, как и на рис. 1

При сборке прибора, как видно на рис. 3 и 4, использовался фиолетовый лазер, при получении тестовых измерений он был заменен на красный.

#### IV. Выводы

В работе описаны основные свойства оптических волокон имеющих определяющее влияние на эффективность спектрографов с оптоволоконным входом, применяющихся для решения астрофизических задач. Даётся описание разработанной нами методики исследования оптических волокон, а также описание лабораторного макета, созданного с целью практической отработки этой методики.

После практической проверки нашей методики на и получения первых результатов базе этого макета планируется создать лабораторную установку для исследования волокон, и провести исследования оптических волокон для оптоволоконного спектрографа телескопа Цейсс-1000. Следует отметить, что подобных исследований оптических волокон в плане их применимости для решения наблюдательных астрофизических задач в России до настоящего времени не было.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Panchuk V.E., Yushkin M.V., Yakopov M.V. High-resolution fiber-fed spectrographs // Astrophysical Bulletin. – 2011. – Vol.. 66. – P. 355-370.
2. Baranne A., Duchesne M. Le spectrographe coudé "Echel.E.C.152" (Montage à pupille blanche pour caméra électronique) // Proceedings of ESO/CERN conference on auxiliary instrumentation for large telescopes / Ed. by S. Lautsen and A. Reiz. (ESO/CERN, Geneva, Switzerland, 1972). – P. 241-245.
3. Klein K.-F., Khalilov V.K. UV-fibers: two decades of improvements for new applications // Proc.SPIE. – 2015. – Vol. 9317. – P. 93170S.
4. Carrasco E., Parry I.R. A method for determining the focal ratio degradation of optical fibres for astronomy // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1994. – Vol. 271. – P. 1-12.

# Сравнительный анализ вертикальных ветротурбин

**Ледерер Пётр Алексеевич**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*plederer25@gmail.com*

**Кочубей Даниил Сергеевич**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*kochubyay@sfedu.ru*

**Аннотация.** Альтернативные методы производства электроэнергии в современном мире становятся всё более популярны. Ветроэнергетика является одной из самых производительных отраслей альтернативной энергетики. Промышленные ветроустановки чаще всего используют горизонтальный трёхлопастной ротор ветротурбины, однако существуют и другие конструкции ротора, в том числе и вертикальные. В работе рассмотрены основные виды вертикальных ветротурбин, разобраны плюсы и минусы каждой конструкции, а также представлены данные, полученные в ходе эксперимента.

**Abstract.** Alternative methods of electricity generation in the modern world are becoming more and more popular. Wind energy is one of the most productive branches of alternative energy. Industrial wind turbines most often use a horizontal three-bladed wind turbine rotor, but there are other rotor designs, including vertical ones. The paper considers the main types of vertical wind turbines, analyzes the pros and cons of each design, as well as presents the experimental data obtained during the experiment.

**Ключевые слова:** альтернативная энергетика, ветроэнергетика, вертикальные ветротурбины.

**Keywords:** alternative energy, wind energy, vertical wind turbines.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Основными преимуществами вертикальных ветроустановок над горизонтальными являются пониженная шумовая нагрузка и более низкие скорости ветра, которые требуются для эффективной выработки электроэнергии.

Горизонтальные ветрогенераторы выходят на "рабочие" обороты на скоростях ветра выше 6 м/с, в отличие от вертикальных аналогов способных вырабатывать электричество уже при 3–4 м/с.

Все существующие на данный момент вертикальные ветротурбины можно разделить на две группы по принципу действия: турбины типа Савонius так же называемые ротор сопротивления (Resistance runner), и турбины типа Дарье, принцип работы которой основан на подъёмной силе (Uplift runner), действующей на лопасти ротора.

На основе этих двух подходов создано большое количество различных конструкций вертикальных роторов. На рис. 1 представлены наиболее часто встречающиеся из них – обыкновенный Савониус, геликоидный Савониус, геликоидный Дарье и Н-образный Дарье. 3D моделирование роторов выполнено в САПР SolidWorks.

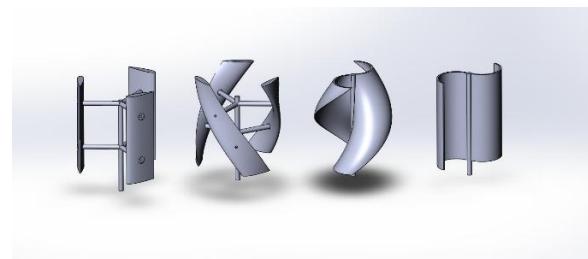


Рис. 1. Популярные виды вертикальных роторов ветротурбин

## II. КОЭФФИЦИЕНТ БЫСТРОХОДНОСТИ

Одним из основных параметров ротора ветрогенератора является быстроходность, равная отношению линейной скорости лопасти к скорости набегающего ветряного потока. Другое название этого параметра - коэффициент быстроходности или коэффициент преобразования. Значение этого коэффициента для разных типов роторов представлена на рис. 2.

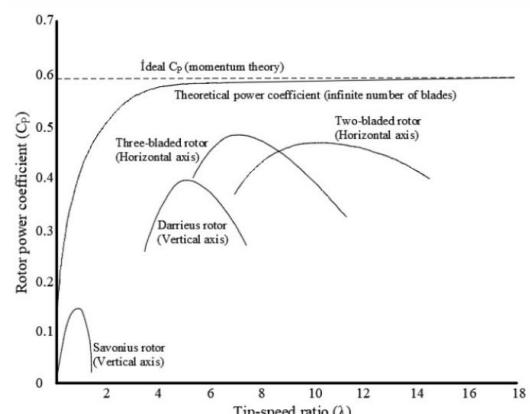


Рис. 2. Популярные виды вертикальных роторов ветротурбин

Ось ординат – коэффициент преобразования  $C_p$ , на оси абсцисс отношение скорости лопасти к скорости ветра [1]. Из представленного графика можно заметить, что ротор Савониуса является менее быстроходным чем ротор Дарье. Однако стоит отметить, что любой вертикальный ветрогенератор имеет меньший коэффициент быстроходности по сравнению с трёхлопастными горизонтальными ветрогенераторами.

Так же можно обратить внимание на пунктирную линию с идеальным Ср. В 1919 году немецким физиком Альбертом Бецом доказано, что максимальное теоретически возможное значение Ср не может быть выше 59.3%, это значение называется предел Беца [2].

Доказательство выполняется через закон сохранения массы, справедливо следующее выражение (1):

$$m = pA_1v_1 = pSv = pA_2v_2, \quad (1)$$

где  $v_1$  – скорость потока перед ротором,  $v_2$  – скорость потока за ротором,  $v$  – скорость на гидравлическом сливом устройстве,  $p$  – плотность среды,  $S$  – площадь ротора,  $A$  – сечение потоков воздуха на входе и выходе из ротора.

По второму закону Ньютона, справедливо следующее выражение (2):

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} = m\Delta u = pSv(v_1 - v_2). \quad (2)$$

Мощность можно рассматривать как работу силы, действующей со стороны ротора на поток воздуха или как потерю энергии воздушным потоком за единицу времени.

В дифференциальной форме работу, совершающую силой, можно записать как (3):

$$dE = Fdx. \quad (3)$$

Мощность таким образом принимает вид (4):

$$P_1 = \frac{dE}{dt} = F \frac{dx}{dt} = Fv. \quad (4)$$

После замены  $F$  на найденное ранее выражение (2) для силы, получим следующее уравнение (5):

$$P_1 = pSv^2(v_1 - v_2). \quad (5)$$

Мощность как потерю энергии воздушным потоком за единицу времени можно посчитать с помощью следующих выражений (6):

$$P_2 = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_2^2). \quad (6)$$

Формула мощности, после подстановки вместо  $m$  выражения (1), принимает следующий вид (7):

$$P_2 = \frac{1}{2}pSv(v_1^2 - v_2^2). \quad (7)$$

Так как мощности  $P_1$  и  $P_2$  равны справедливы выражения (8) и (9):

$$pSv^2(v_1 - v_2) = \frac{1}{2}pSv(v_1^2 - v_2^2). \quad (8)$$

$$v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2). \quad (9)$$

Выражение для мощности через кинетическую энергию имеет следующий вид (10):

$$E = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2}pSv(v_1^2 - v_2^2). \quad (10)$$

После раскрытия скобок и упрощения уравнение принимает следующий вид (11):

$$E = \frac{1}{4}pSv \left( 1 + \left( \frac{v_2}{v_1} \right) - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right). \quad (11)$$

Теперь необходимо продифференцировать выражение (10) по  $\frac{v_2}{v_1}$  при постоянных  $v_1$ ,  $S$  и приравнивая полученное выражение к нулю. Находим экстремум при  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$ . Подставляя этот результат в выражение (11), получим следующее выражение (12):

$$P_{max} = \frac{16}{27} * \frac{1}{2}pSv_1^3. \quad (12)$$

Таким образом,  $Cp = \frac{16}{27} = 0.593$  является максимальным теоретически возможным коэффициентом преобразования энергии в ветротурбине.

### III. СРАВНЕНИЕ РОТОРА ТИПА САВОНИУС С РОТОРОМ ТИПА ДАРЬЕ

Как было отмечено ранее быстроходность ротора типа Савониус в несколько раз меньше, чем у ротора типа Дарье. В первую очередь это связано с их принципом и особенностями работы этих турбин.

Одним из факторов уменьшающим быстроходность ротора Савониуса является то, что при совершении обогрева, лопасть вследствие оказываемого сопротивления от набегающего воздушного потока начинает тормозить вращение [3]. Иллюстрация этого процесса представлена на рис. 3.

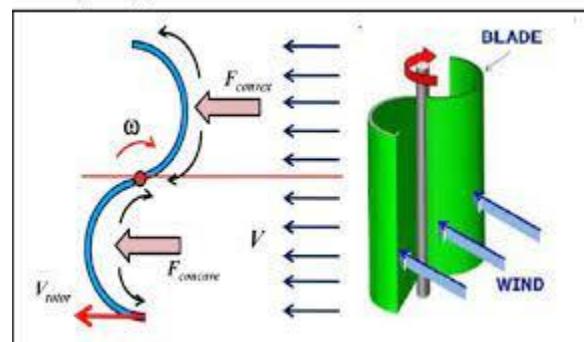


Рис. 3. Принцип работы ветрогенератора с ротором Савониус

Низкий КПД ветрогенераторов, использующих в своей основе исключительно ротора Савониуса, обуславливает низкую популярность таких энергоустановок. Использование промышленных установок на основе ротора Савониуса нецелесообразно.

В то же время роторы типа Дарье, поддерживают своё вращение за счёт подъёмной силы, появляющейся благодаря тому, что лопасти ротора выполнены в форме крыла. Наиболее часто для вертикальных ветроустановок используются следующие профили крыла: NACA 0030, NACA 0021, NACA 0020 и NACA 0018 [4]. Внешний вид некоторых популярных профилей крыла используемых в вертикальных ветрогенераторах представлен на рис. 4.

Одним из наиболее распространённых типов роторов Дарье является Н-образный ротор, представленный на рис. 5. Одним из его преимуществ перед другими видами является относительная простота изготовления и характерная для роторов Дарье быстроходность.

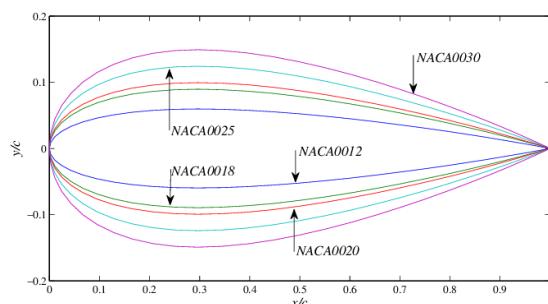


Рис. 4. Внешний вид различных профилей крыла



Рис. 5. H-образный ротор Дарье

H-образный ротор Дарье имеет популярную модификацию – геликоидный ротор Дарье. В отличие от H-образного геликоидного оказывает меньшие нагрузки на основание ветряка, благодаря чему издаёт меньше шума, однако из-за сложности производства готовые решения, построенные на базе геликоидных роторов Дарье не популярны.

У роторов Дарье есть один существенный минус, такие ветротурбины не могут самостоятельно начать вращение при слабом ветре (2–3 м/с).

Для устранения этого эффекта на центральной оси ветрогенератора размещается миниатюрный ротор Савониуса, заставляющий установку начать вращение [5]. Пример такой конструкции представлен на рис. 6.

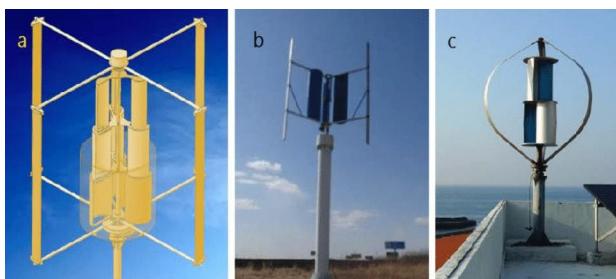


Рис. 6. Ротор Дарье со стартовым ротором Савониуса внутри

#### IV. ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА, ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ЛОПАСТЕЙ НА МОЩНОСТЬ ВЕТРОУСТАНОВКИ

Увеличение количества лопастей пропорционально уменьшает скорость вращение ротора ветроустановки, вследствие чего уменьшается выработка электроэнергии. Поэтому на практике вертикальные ветрогенераторы с количеством лопастей больше 3 используются редко.

Взаимное расположение ширина и толщина лопастей играют важную роль при проектировании ветрогенератора.

Так как в разной местности среднегодовая скорость ветра может значительно отличаться для эффективной работы установки конструкционные параметры ротора необходимо выбирать, основываясь на среднегодовой выработке электроэнергии, а не на основании максимальной пиковой мощности.

В местах со среднегодовой скоростью ветра в 3–4 м/с оптимальнее всего использовать ротор Дарье с соотношением сторон  $\frac{H}{D}$ , где  $H$  – высота лопасти ротора, а  $D$  – диаметр ротора равным 0.55. При этом длина лопасти должна лежать в диапазоне от 0.297–0.378 м. [6]

#### V. ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ВЕТРОУСТАНОВКИ

Моделирование вертикальных ветроустановок в силу их относительной непопулярности по сравнению с горизонтальными конкурентами является нетривиальной задачей.

Для этих целей можно использовать САЕ такие, как Ansys fluent или Solidworks Flow Simulation. Помимо этого, существуют специализированные программы для моделирования ветротурбин различной формы, в том числе и вертикальных. К одной из таких систем относится программа с открытым исходным кодом QBlade. С помощью этого ПО можно провести анализ смоделированной ветротурбины, узнать теоретический коэффициент преобразования, мощность установки, а также момент, который сможет развить ротор [7]. Иллюстрация процесса симуляции в Qblade представлена на рис. 7.

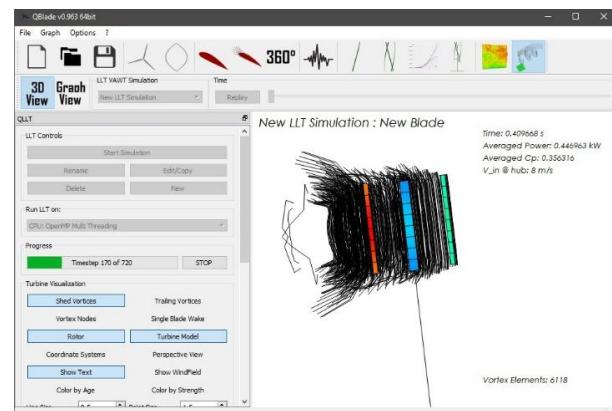


Рис. 7. Процесс симуляции ветротурбины в Qblade

#### VI. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РОТОРЫ

Для проверки теории было принято решение создать миниатюрную аэротрубу и продуть в ней следующие виды вертикальных ветротурбин:

1. Дарье H-образный.
2. Дарье геликоидный.
3. Савониус обыкновенный.
4. Савониус геликоидный.

Аэротруба представляет из себя фанерный короб. Скорость ветра внутри аэротрубы фиксировалась с помощью немеханического анемометра, работающего по принципу hot-wire, закреплённого внутри трубы.

В ходе эксперимента с помощью геркона фиксировалось количество оборотов, которые совершают ротор за одну секунду, а также с помощью закреплённого снизу электродвигателя были получены значения силы тока на разных скоростях вращения. Внешний вид установки представлен на рис. 8.



Рис. 8. Внешний вид экспериментальной установки

Опрос датчиков и запись данных происходили в автоматическом режиме с помощью созданного на базе отладочной платы Arduino устройства. Полученные данные с Arduino передавались на компьютер для последующей обработки. Принципиальная схема устройства представлена на рис. 9.

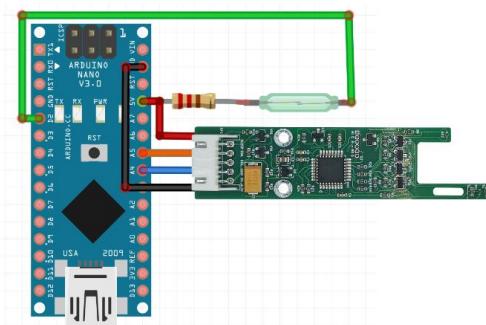


Рис. 9. Принципиальная схема устройства

С результатами эксперимента можно ознакомиться в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Название ротора	Усреднённые данные с датчиков		
	Оборотов в секунду	Сила тока	Скорость ветра
Дарье Н-образный	1	12mA	12 м/с
Савониус обыкновенный	4	70 mA	12 м/с
Дарье геликоидный	2	24 mA	12 м/с
Савониус геликоидный	5	90 mA	12 м/с

Проведённый нами эксперимент не подтвердил выдвинутых гипотез, скорость вращения и мощность роторов типа Савониус оказалась выше, чем у ротора Дарье.

Основной причиной такого результата является несовершенство конструкции Н-образного и Геликоидного роторов. Как было сказано ранее соотношение размеров лопастей к общему радиусу и высоте установки является крайне важным параметром, который необходимо учитывать при проектировании ветротурбин такого типа.

Ещё одной возможной причиной неудачного эксперимента является недостаточная жёсткость моделей роторов.

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены основные виды вертикальных роторов ветрогенераторов, сделаны выводы о перспективности использования каждого из них.

Наиболее перспективным и экономически целесообразным является Н-образный ротор Дарье. Легкость производства и высокий КПД делают такой вариант установки наиболее выгодным.

В ходе дальнейшей работы планируется создать полноразмерный прототип ветроэнергетической установки и провести его испытания в реальных условиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Abdullah Muratoglu, Muhammed Sungur Demir. Numerical Analyses of a straight bladed vertical axis Darrieus wind turbine: verification of dms algorithm and Qblade code // European Journal of Technic. – Doi: 10.36222/ejt.643483.
2. Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. – Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd., February 2012. – P. 92–96. – ISBN 9780470015001.
3. Frederikus Wenehenebuna, Andy Saputraa, Hadi Sutantoa. An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades // 2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, ICSEEA 2014. – DOI: 10.1016/j.egypro.2015.03.259.
4. Batista N.C., Rui Melicio, João Matias, João P.S. Catalão. Self-start performance evaluation in Darrieus-type vertical axis wind turbines: Methodology and computational tool applied to symmetrical airfoils // Renewable energy power quality journal. – 2011 – DOI: 10.24084/repqj09.302.
5. Palanisamy Mohan Kumar, Krishnamoorthy Sivalingam, Srikanth Narasimulu, Teik-Cheng Lim. A Review on the Evolution of Darrieus Vertical Axis Wind Turbine: Small Wind Turbines // Journal of Power and Energy Engineering. – 2019. – DOI: 10.4236/jpee.2019.74002.
6. Alessandro Bianchini, Giovanni Ferrara, Lorenzo Ferrari. Design guidelines for H-Darrieus wind turbines: Optimization of the annual energy yield // Energy Conversion and Management. – January 2015. – Vol. 89, 1. – P. 690–707. – DOI: j.enconman.2014.10.038.
7. Amani Altmimi, Mustafa Alaskari, Oday I. Abdullah, Ahmed Alhamadani. Design and Optimization of Vertical Axis Wind Turbines Using QBlade // Applied System Innovation. – October 2021. – DOI: 10.3390/asi4040074.

## Секция II

# ИНТЕЛЕКТУАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

DOI: 10.18522/syssyn-2022-17

## Toward an Ultra-Low Latency Based Q-learning Assisted 6TiSCH Network in Smart Industries

**Mohammed Saleh Ali Muthanna**  
Institute of Computer Technologies  
and Information Security  
Southern Federal University  
Taganrog, Russia  
*muthanna@sfedu.ru*

**Tselykh Alexey**  
Institute of Computer Technologies  
and Information Security  
Southern Federal University  
Taganrog, Russia  
*tselykh@sfedu.ru*

**Abstract.** Smart industry is a significant implementation of Internet of Things (IoT). IPv6 over Time Slotted Channel Hopping (6TiSCH) is a new standard that emerges as promising technology for industrial communications. The demanding issues of smart industries include scalability, and latency. Literature works presented a scheduling scheme for 6TiSCH-based industries. However, the prime limitation in those works is that the works are not suitable for practical scenario where emergency situations frequently occur. This paper aims to improve scalability, and latency in 6TiSCH-based smart industries for practical scenario. New Fog-assisted 6TiSCH Q\_learning algorithm is designed, and smart communication layer. Scalability and latency is handled by fog computing in smart communication layer. In fog layer, rank based Q-learning algorithm performs offloading to manage energy consumption among fog nodes.

**Keywords:** Fog Computing, Offloading, 6TiSCH, Smart Industry.

### I. INTRODUCTION

Industry 4.0, in other words smart industry, describes the current trend and the impact of Internet of Things (IoT) in manufacturing fields [1–3]. Industrial automation is major objective of Industry 4.0 and it has been realized with the assistance of smart sensors and actuators. Radio Frequency Identification (RFID) wireless sensor network (WSN) technologies have been widely used for Industry 4.0. Besides, cloud computing [4] and fog computing [5] are the functional blocks of Industry 4.0 that minimize the communication. In particular, fog computing is realized as the potential middleware for real-time industrial scenarios [6, 7]. Fog computing provides the local processing capability for industrial networks which further results in much lower latency. Fog computing play pivotal role in industri-

al applications. Fog computing based Industry 4.0 is designed with physical resources layer (smart things), network layer (enables communication), fog layer, and control layer [8]. However, deployment of fog computing is restricted by energy efficiency (fog nodes also have energy restrictions), computational overloading, and deployment area [9]. Thus, it is necessary to consider these constraints during fog computing and Industry 4.0 integration.

On the other hand, the Internet Engineering Task Force (IETE) working group has been defined the IPv6 over the Time Slotted Channel Hopping (6TiSCH) specifically for industrial networks [10, 11]. In severe industrial conditions like safety alarm data, fire accident data and so on, 6TiSCH have demonstrated high reliability and lower power consumption. 6TiSCH is working upon IEEE 802.15.4e standard with the Time Slotted Channel Hopping (TSCH) mode [12]. Industrial networks with 6TiSCH can be easily integrated with the “internet” which fulfills the vision of “cloudified” industry. 6TiSCH standard has been utilized for robotic-assisted IoT deployment and unmanned ground vehicle [13]. 6TiSCH based industrial network is designed in indoor environment [14]. The channel hopping must be fast and the Medium Access Control (MAC) layer of 6TiSCH network have to be optimized for achieving better performance.

In recent years, Industry 4.0 brings revolution in the industries it also introduces the requirement of seamless internet connectivity, communication ability, and computational abilities. Some research efforts have been made for fog based Industry 4.0 [15, 16] and 6TiSCH based Industry 4.0 [17, 18]. The fog assisted industries work well in delay sensitive industrial applications while 6TiSCH provides connectivity among objects. To best of our knowledge there is no work in the literature that focuses on both fog and 6TiSCH based industrial networks. Besides, there is several challenges have not been addressed in prior research works in the context of Industry

The research is supported by postdoc fellowship granted by the Institute of Computer Technologies and Information Security, Southern Federal University, project № PD/22-01-KT.

4.0 [19]. In 6TiSCH-based networks, latency is the major issue due to slow channel hopping. Even in fog based networks, computational overloading increases the latency. High latency affects the overall network performance.

Main objective and contribution of this paper to design of intelligent fog offloading scheme to improve latency in the context of smart industry.

## II. PROBLEM STATEMENT

The major objective of this work is to improve latency in smart factories via 6TiSCH networks. The proposed smart industry comprises  $n$  number of smart devices (sensors and actuators),  $m$  number of fog nodes, and cloud server. This work also considers emergency data from the devices and the main objective is formulated as follows,

$$\text{Objective} = \min\{\mathfrak{L}\}. \quad (1)$$

Where  $\mathfrak{L} = \{\mathfrak{L}_S + \mathfrak{L}_{Fn}\}$  computed based on the latency at sensor ( $\mathfrak{L}_S$ ) and fog node ( $\mathfrak{L}_{Fn}$ ). From eqn. (1), the objective function of the proposed work is to minimize latency. The problem statement for this objective is that ‘latency ( $\mathfrak{L}$ ) is affected by improper scheduling of data in 6TiSCH network’. The specific problems are listed as follows,

**Problems in offloading-** A deep learning based offloading scheme was presented for IoT based manufacturing fields [02]. The deep learning algorithm was offloaded to cloud. Based on the analysis decision, offloading was performed among fog nodes. Offloading decision making on cloud increases latency for end users. Transmission of intermediate data to cloud increases the energy and time consumption. A post-decision-state-based algorithm was proposed for fog offloading and autoscaling policy [02]. Offloading data size and autoscaling policy was utilized to balance the load. Here the data offloading is performed from single fog node to cloud server which increases latency. Thus the problems in offloading are,

- Large time consumption and latency.
- Increased energy consumption.

The aforesaid research problems are considered in this work. Based on these problems following research questions are formulated,

- How to minimize latency in offloading and to how to process offloading locally in fog layer?

For the above research question, the novel solutions are proposed in this paper.

## III. PROPOSED FOG OFFLOADING

As stated earlier, fog computing minimizes the latency and improve the scalability. Thus, we use fog computing in smart communication layer as shown in figure 1. In this layer, SG and fog nodes are deployed. The major issue of offloading is performed among fog nodes. This layer receives data from the network layer. The aggregated data is classified by SG into emergency and non-emergency based on the *Flag Value*. Then the emergency data is transmitted to nearest fog nodes and the non-emergency data is distributed over the fog nodes. In this case, there is high possibility for computational overloading in fog nodes. In order to handle this situation and to improve the energy efficiency, this work proposes a fog offloading strategy in smart communication layer.

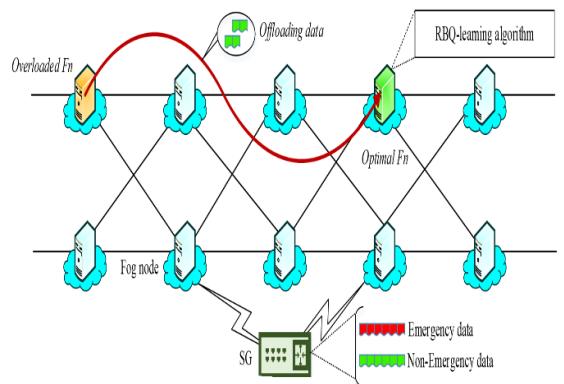


Fig. 1. Proposed fog offloading

In contrast to existing works, offloading decision is made locally by SG and the offloading is performed based on significant criteria. We proposed a RBQ-learning algorithm for offloading in fog layer. The combination of ranking algorithm and Q-learning which is the reinforcement algorithm results in better performance. In proposed RBQ-learning algorithm, the SG monitors the fog nodes based on the load ( $\mathbb{L}$ ) and energy level ( $\mathbb{E}$ ). When the fog node is overloaded or energy level is drained, then SG makes local decision on offloading. The process of local decision making and offloading by RBQ-learning algorithm is performed as follows,

**Initialize Q-values-** At first, the Q-table is designed for State-Action pairs. The Q-learning captures the history information of target application (in this work fog offloading). The history information includes the *State – Action* pairs. It can be represented as  $Q(s, a)$ .

**Choose an action-** To learn from the system environment, the knowledge is needed to be explored. This work uses  $\epsilon$ -greedy as exploration policy. It selects the action which maximizes the reward function. The set of states is denoted by  $S (s_1, s_2, ..)$  and the set of actions is denoted by  $A (a_1, a_2, ..)$ . The state defines the current load and energy status of the fog node. Similarly, the action is offload or no\_offload.

**Perform action-** Then the chosen action is executed by the SG. For example, consider the following *State – Action*,

$$s(\mathbb{L} = \text{High}, \mathbb{E} = \text{Low}) \rightarrow a(\text{offload})$$

$$s(\mathbb{L} = \text{Low}, \mathbb{E} = \text{High}) \rightarrow a(\text{no\_offload})$$

When the state of any  $Fn$  is overloaded and lower energy, then the action is to offload. This decision is made by the SG locally. For instance, if a  $Fn$  has High  $\mathbb{L}$  and low  $\mathbb{E}$ , then the action is (offload).

For offloading, the optimal fog node  $Fn_{opt}$  is selected by ranking the other fog nodes. Ranking is performed by considering current load value ( $\gamma$ ), and response time ( $\lambda$ ). The ranking factor ( $Rf$ ) is determined as,

$$Rf = (\gamma + \lambda). \quad (2)$$

Then the  $Fns$  are sorted in ascending order based on  $Rf$  value. Then the  $Fn$  which has highest  $Rf$  is selected as  $Fn_{opt}$ . The involvement of ranking procedure in RBQ-learning improves the reward function. The reward function

is computed based on the load of  $Fn_{opt}$  after offloading. The expected reward function of current  $s, a$  ( $r(s, a)$ ) pair is computed by,

$$r(s, a) = \sum_{r \in R} \sum_{s' \in S} p(s', r | s, a). \quad (3)$$

The reward function is defined from the energy and load level of the fog node. That is the energy consumed for offloading and the load level of offloading is defined as the reward function. Thus the value of transition to particular state ( $s$ ) is defined as,

$$V(s) = \max a (r(s, a) + r \sum s' P(s, a, s') V(s')). \quad (4)$$

Where  $P(s, a, s')$  denotes the probability of transition from  $s$  to next state  $s'$  and  $V(s')$  denotes the value of the next state.

The data from the overloaded fog node is offloaded to the  $Fn_{opt}$  in order to improve the performance of fog layer.

#### Pseudocode 1: RBQ-learning for offloading

Begin

```

For all  $Fn_i \in Fn$ 
    Monitor  $\mathbb{E}, \mathbb{L}$ 
    Initialize  $Q(s, a), s \in S(s_1, s_2, \dots), a \in A(a_1, a_2, \dots)$ 
    Choose  $a$  from  $A$ 
    If ( $a = offload$ ), then
        Find  $Rf$  for other  $Fns$ , and  $Fn \neq Fn_i$ 
        Rank  $Fns$ 
        Get ( $Fn_{opt}$ )
        Offload  $Fn_i \rightarrow Fn_{opt}$ 
        Compute  $r(s, a)$ 
        Update  $V(s)$ 
    End if
End for
End
```

End

*Pseudocode 1* description- The process of RBQ-learning algorithm is initiated by SG to balance the load among  $Fns$ . At first, the load level of each fog node is monitored by the SG. Then the action of offloading is made based on  $s, a$  pair. If the offloading is performed, then the  $Fn_{opt}$  is selected by ranking algorithm. The  $Fn$  which is selected as  $Fn_{opt}$  receives data from the overloading  $Fn$ . Finally, the reward function is computed and the Q-table is updated. It is worth to note that the normal data is only offloaded in this work. The emergency data is not offloaded in order to ensure minimum latency for emergency data. Data offloading mitigates the problem latency by minimizing the load of fog nodes.

## IV. EXPERIMENTAL RESULTS

This section evaluates the proposed work through extensive experiments. This section consists of two sub-sections as experimental setup and comparative study.

### A. Experimental Setup

The proposed architecture is modeled in ns-3.26 which is the discrete event simulator. To install, ns-3.26, Ubuntu 14.04 operating system is used on our PC. The entire code is written C++ language and the bindings are available in Python programming language.

TABLE 2 . SIMULATION PARAMETERS

Simulation area		1000*1000m
System configuration	OS	Ubuntu 14.04
	Memory	2GB
	Language	C++
	Simulator	Ns-3.26
	Standard	IEEE 802.15.4e
	Technology	6TiSCH
	Number of nodes	50
	Number of DODAGs	6
	Initial energy level	1000 J
	Mobility model	Random waypoint
Smart communication layer configuration	Mobility speed	10 m/s (Maximum)
	Transmission range	400m
	Bandwidth	868/915 MHZ
	Channel offsets	6
	Time slot duration	10 $\mu$ s
	Number of packets	200
	Number of emergency packets	20
	Packet size	1024 KB
	Flag value	0-Normal, 1-Emergency
	Data rate	40 kbps
Simulation time	Packet interval	0.1s
	Number of SG	1
	Number of Fns	5
	Initial energy level	1000 J
	Topology	Fully connected
		30 s

In table 2, the significant simulation parameters considered for proposed work evaluation are enlisted. The simulation testbed for proposed work is created with 50 sensor/actuator nodes (in red color) and 5 fog nodes (in green color). The entire simulation is performed in varying network size and simulation time. The constructed simulation environment in ns-3.26 is illustrated in figure 0a.

The figure 2 depicts the simulation of the proposed approach in which, the figure 2 (a) illustrates the main file of the simulation which provides the information about the directories used in the simulation process. Figure 2 (b) depicts the radio model and other advanced settings utilized for the simulation. Figure 2 (c) presents the initial screen of simulation in which the nodes are initialized. Figure 2 (d) depicts the authentication of nodes by the trusted authority and figure 2 (e) illustrates the formation of Q-learning structure, selection of trusted parent node and transmission of data.

```

main.csc (-/contiki/examples/lpv6/Reliable_Emergency_Data_Transmission) - edit
main.csc  Open  Save  Undo  Redo  Help
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<project>
    <export name="discard"><APPS_DIR>/rm</project>
    <export name="discard"><APPS_DIR>/avrora</project>
    <export name="discard"><APPS_DIR>/serial_socket</project>
    <export name="discard"><APPS_DIR>/powertracker</project>
</project>
<title>6TiSCH</title>
<randomseed>1000000</randomseed>
<notedelay_us>1000000</notedelay_us>
<radio>
    <org.contikilos.cooga.radio.>radioMediums.UDGM
    <transmitting_range>50.0</transmitting_range>
    <tx_power>0.0</tx_power>
    <success_ratio_tx>1.0</success_ratio_tx>
    <success_ratio_rx>1.0</success_ratio_rx>
</radio>
<events>
    <event>
        <input>40000</input>
        <output>40000</output>
    </event>
</events>
<nodeTypes>
    <ident type="contikiMote">
        <options>
            <option name="Device"><description>Cloud</description><source>[CONTRIB_DIR]/examples/lpv6/Emergency_Data_Transmission/cloud.c</source></option>
            <option name="Commands"><source>[CONTRIB_DIR]/examples/lpv6/Emergency_Data_Transmission/cloud_commands.c</source></option>
        </options>
        <noteInterface>org.contikilos.cooga.Interfaces.Position</noteInterface>
        <noteInterface>org.contikilos.cooga.Interfaces.Routing</noteInterface>
        <noteInterface>org.contikilos.cooga.Interfaces.ContikiVb</noteInterface>
        <noteInterface>org.contikilos.cooga.Interfaces.ContikiHd</noteInterface>
        <noteInterface>org.contikilos.cooga.Interfaces.ContikiBeeper</noteInterface>
        <noteInterface>org.contikilos.cooga.Interfaces.RtmpAddress</noteInterface>
        <noteInterface>org.contikilos.cooga.Interfaces.ContikiIpaddress</noteInterface>
    </ident>
</nodeTypes>

```

Fig. 0 (a) Main file of simulation

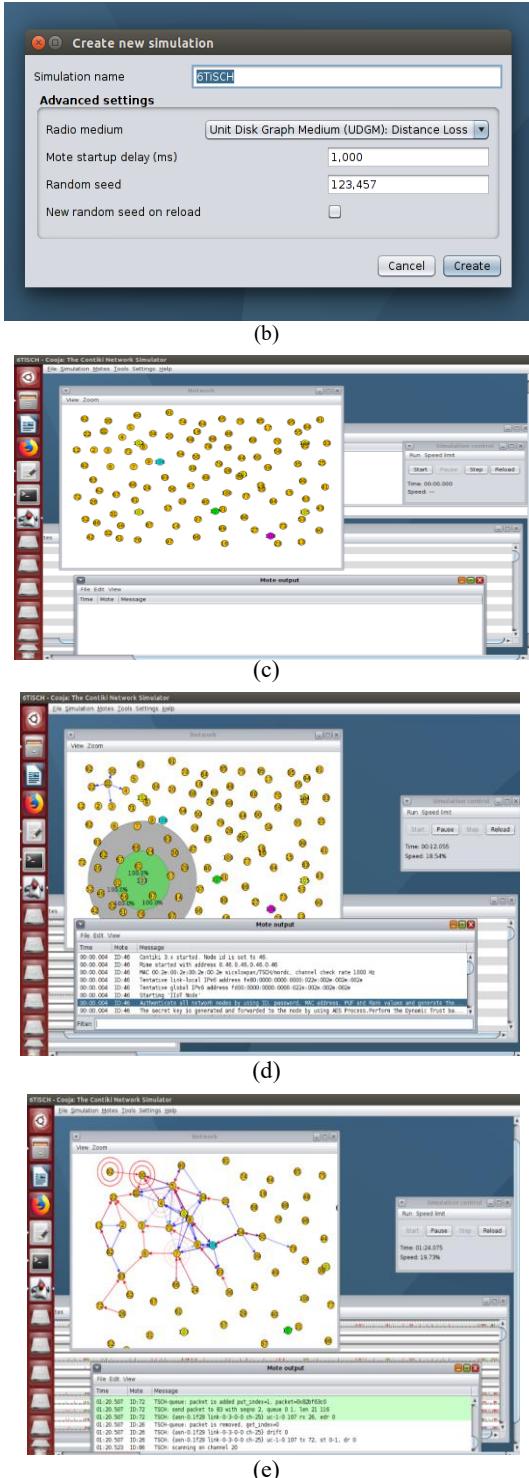


Fig. 2 (b) Simulation settings, (c) Initialization of nodes, (d) Node authentication, (e) Q\_learning formation, parent selection, and data transmission

#### B. Comparative analysis

Latency is introduced due to inefficient processing. The major objective of fog computing is to minimize the time consumption of overall system. However, ineffectual processing capabilities of fog layer increases latency and response time.

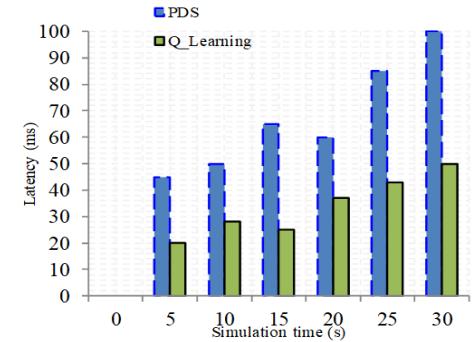


Fig. 3 (a) Latency in layer-II

Figures 3 (a) and 3 (b) compare the latency and response time of the proposed work respectively. In both comparisons, proposed work shows the better results than prior PDS method. When the simulation increases then the latency is also increased in all two works. However, the proposed architecture achieves much minimum latency than previous works. In the 30s of simulation time, the latency attained by proposed work is 40ms while PDS approach is 100ms. Likewise, the response time also has huge difference between proposed work and previous works. Response time compared with respect to number of nodes in order to measure the efficiency of proposed work in varying network size. Network size plays minor role response time for proposed architecture (i.e.) the network is scalable and can handle huge number of nodes. in prior works, varying network size results in improper variations in response time. When  $n = 50$ , the response time in proposed work is 9ms. At the same time, PDS approach has 42ms of response time.

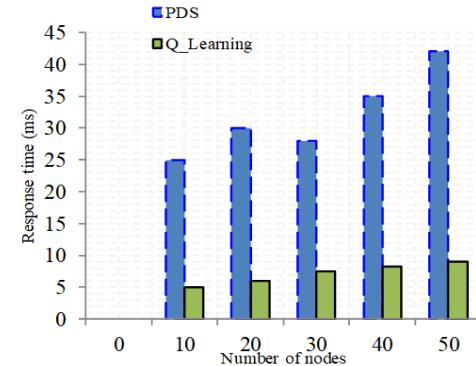


Fig. 3 (b) Response time in layer-II

Based on the analysis, the proposed architecture works better than previous fog-computing architectures. The major reason behind this performance variation is the involvement of optimal offloading scheme. Firstly, we make the offloading decision locally based on the network state. Then we perform offloading by considering significant criteria. Thus, we achieve better results in each evaluation.

TABLE.0 NUMERICAL COMPARISON ON PROPOSED FOG OFFLOADING

Works	Latency (ms)	Response time (ms)
PDS approach	56.3	26.6
Q_learning	33.8	7.14

In table 2, the overall comparison on smart communication layer is presented. It can be seen that the mean value reveals that the proposed work has minimum latency, and response time compared to prior works. Thus, the proposed RBQ-learning algorithm outperforms in offloading.

## V. CONCLUSION

In this paper, we design the networks with 6TiSCH and fog computing technologies. In smart communication layer, intelligent local offloading scheme is proposed to improve the latency. RBQ-learning algorithm is proposed for fog offloading. Thus, this layer is optimized to achieve low latency. The experimental observations show that the proposed Q\_learning architecture outperforms with existing work in terms of latency, and response time. In future, we plan to analyze the proposed tri-layer architecture in real-time environment. Involvement of security threats often degrades the energy efficiency and network performance which means security provisioning for smart industries is the demanding future direction. Thus, we plan to explore the security aspects of the 6TiSCH and fog computing in the perspective of energy efficiency.

## REFERENCES

1. Lu Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues // Journal of Industrial Information Integration. – 2017. – 6. – P. 1-10.
2. Wollschlaeger M., Sauter T., & Jasperneite J. The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0 // IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2017. – 11. – P. 17-27.
3. Xu L.D., Xu E.L., & Li L. Industry 4.0: state of the art and future trends // International Journal of Production Research. – 2018. – 56 (8). – P. 2941-2962.
4. Thamees J.L., & Schaefer D. Software-defined cloud manufacturing for Industry 4.0 // Procedia CIRP. – 2016. – 52. – P. 12-17.
5. Peralta G., Iglesias-Urkia M., Barcelo M., Gomez R., Moran A., & Bilbao J. Fog computing based efficient IoT scheme for the Industry 4.0 // 2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM). – 2017. – P. 1-6.
6. Aazam M., Zeadally S., & Harras K.A. Deploying Fog Computing in Industrial Internet of Things and Industry 4.0 // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2018. – 14. – P. 4674-4682.
7. Chen L., Zhou P., Gao L., & Xu J. Adaptive Fog Configuration for the Industrial Internet of Things // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2018. – 14. – P. 4656-4664.
8. Baccarelli E., Naranjo P.G., Scarpiniti M., Shojafar M., & Abawajy J.H. Fog of Everything: Energy-Efficient Networked Computing Architectures, Research Challenges, and a Case Study // IEEE Access. – 2017. – 5. – P. 9882-9910.
9. Lin C., & Yang J. Cost-Efficient Deployment of Fog Computing Systems at Logistics Centers in Industry 4.0 // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2018. – 14. – P. 4603-4611.
10. Vallati C., Brienza S., Anastasi G., & Das S.K. Improving Network Formation in 6TiSCH Networks // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2019. – 18. – P. 98-110.
11. Karalis A., Zorbas D., & Douligeris C. Collision-Free Advertisement Scheduling for IEEE 802.15.4-TSCH Networks . Sensors. – 2019.
12. Vilajosana X., Watteyne T., Vučinić M., Chang T., & Pister K.S. 6TiSCH: Industrial Performance for IPv6 Internet-of-Things Networks // Proceedings of the IEEE. – 2019. – 107. – P. 1153-1165.
13. Valecce G., Micolli G., Boccadoro P., Petitti A., Colella R., Milella A., & Grieco A. Robotic-aided Internet of Things: automated deployment of a 6TiSCH Network using an Unmanned Ground Vehicle // IET Research Journals. – 2019.
14. Hermeto Rodrigo & Gallais Antoine & Theoleyre Fabrice. On the (over)-Reactions and the Stability of a 6TiSCH Network in an Indoor Environment. – 2018. – 10.1145/3242102.3242104.
15. Kaur K., Garg S., Aujla G.S., Kumar N., Rodrigues J.J., & Guizani M. Edge Computing in the Industrial Internet of Things Environment: Software-Defined-Networks-Based Edge-Cloud Interplay // IEEE Communications Magazine. – 2018. – 56. – P. 44-51.
16. Li L., Ota K., & Dong M. Deep Learning for Smart Industry: Efficient Manufacture Inspection System With Fog Computing // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2018. – 14. – P. 4665-4673.
17. Minet P., Soua Z., & Khoufi I. An Adaptive Schedule for TSCH Networks in the Industry 4.0 // 2018 IFIP/IEEE International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks (PEMWN). – 2018. – P. 1-6.
18. Kotsiou V., Papadopoulos G.Z., Chatzimisios P., & Theoleyre F. LABeL: Link-based Adaptive BLacklisting Technique for 6TiSCH Wireless Industrial Networks. MSWiM. – 2017/
19. Raptis T.P., Passarella A., & Conti M. Data Management in Industry 4.0: State of the Art and Open Challenges // IEEE Access. – 2019. – 7. – P. 97052-97093.
20. Li H., Ota K., & Dong M. Learning IoT in Edge: Deep Learning for the Internet of Things with Edge Computing // IEEE Network. – 2018. – 32 (1). – P. 96-101.
21. Xu J., Chen L., & Ren S. Online Learning for Offloading and Aut-scaling in Energy Harvesting Mobile Edge Computing // IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. – 2017. – 3 (3). – P. 361-373.

# Towards a Software Development Process Based on Ontologies

**Nemury Silega**

Institute of Computer Technology and  
Information Security  
Southern Federal University  
Taganrog, Russia  
*silega@sfedu.ru*

**Yury I. Rogozov**

Institute of Computer Technology and  
Information Security  
Southern Federal University  
Taganrog, Russia  
*rogozov@sfedu.ru*

**Vyacheslav S. Lapshin**

Institute of Computer Technology and  
Information Security  
Southern Federal University  
Taganrog, Russia  
*lapshin@sfedu.ru*

**Abstract.** The relevance and complexity of software are growing more and more. Hence, it is necessary to create and apply new approaches that contribute to deal with the complexity of software development process. Ensuring the consistency and traceability of the software artefacts are two of the challenges that software engineers face during the development of a complex software. On the other hand, the ontologies are one of the main technologies of the semantic web for representing knowledge. Adopting ontologies to support the modelling and validation in software development projects is a feasible alternative that has been widely discussed. Therefore, this paper aims to analyze some ontology-based approaches which address some of the gaps that can be faced during software development projects. For example, the lack of consistency and traceability of software artefacts.

**Keywords:** *Software Development Process, Ontologies, Software Quality, Knowledge Management.*

## I. INTRODUCTION

Nowadays software systems are a crucial component to carry out the most diverse human activities. For example, in the domain of enterprise management, health processes, research, education, etc. Hence, the complexity of software systems is growing more and more. In software development projects, the engineers have to struggle with numerous difficulties. For example, with issues related to the domain or with issues related the internal process of the software development process.

Adopting approaches that contribute to reduce the complexity during software projects is essential to deliver software faster and with quality. For example, the ontologies have been widely used to support different stages of the software development process. The ontology-based approaches contribute to address common gaps during software development projects, for example to ensuring the consistency of the artefacts as well their traceability.

Web Ontology Language (OWL) is one of the most prominent languages to represent ontologies. Since OWL is based on description logics, therefore it is a suitable option to represent and analyze knowledge of different domains [1–7]. The semantic representation of information by means of ontologies enables checking the consistency of the information as well as automatic reasoning to infer new knowledge.

The research is supported by postdoc fellowship granted by the Institute of Computer Technologies and Information Security, Southern Federal University, project № PD/20-02-KT

This paper aims to analyze some ontology-based approaches which address some of the gaps that can be faced during software development projects. These approaches are focused on different stages of the software lifecycle and demonstrate how the ontologies can be exploited to alleviate different problems.

The organization of the paper is as follows. Section II describes some important concepts related to the ontologies. Section III presents the results of the analyzed ontology-based approaches. Section IV concludes the paper.

## II. ONTOLOGIES

Among the languages to specify ontologies [8–13], the following stand out: Loom, CycL, Ontolingua, XML Schema, RDF (Resource Description Framework), RDF Schema (or RDF-S) and OWL 2 (Web Ontology Language). Slimani compared how the most popular languages manage to meet the following criteria: attributes criteria, facets criteria, taxonomies criteria, functions criteria or general issues criteria [12]. This analysis yielded that OWL 2 has the best results, satisfying 20 of the 21 requirements.

OWL 2 is based on a logic model that makes it possible to define and describe the concepts. The OWL 2 model is distinguished by its set of operators: intersection, union, and negation. It is based on a logic model that allows defining the concepts as they are described. Furthermore, the possibility of using reasoners allows the consistency of the represented models to be checked automatically. Taking into account its advantages, OWL 2 (hereinafter OWL) was adopted to represent our ontology.

To implement the ontology, the tool Protégé [14], which is an open-source and multiplatform editor developed at Stanford University, is used. It has a flexible and extensible architecture and it is recognized as one of the most used tools for ontological engineering. Ontologies created in Protégé can be exported in various syntax, such as RDF / XML and OWL / XML. On the other hand, FaCT ++, Hermit and Pellet reasoners can be used in the inference process.

The adoption of a solid methodology is crucial to obtain a quality ontology. Several methodologies have been proposed [8, 15, 16]. The methodology proposed by Noy and McGuinness has been widely adopted [17]. This is the most used or cited methodology for designing an ontology [18]. It includes the following steps: Determine the domain and

scope of the ontology, consider reusing existing ontologies, list the relevant terms of the ontology, define the classes and the class hierarchy, define the properties (called relationships or slots) of the classes, define facets and / or restrictions on slots or relationships and finally define instances.

The benefits of adopting ontologies have been extensively documented [19]:

- Support for the generation of domain models employed in different phases of the software development life-cycle.
- Reduction of inconsistency problems between different artifacts generated during the development life cycle that normally occur due to the multi-perspective of involved stakeholders.
- Ease of traceability of these artifacts, which improves the quality of the software system (e.g. change impact analysis, maintenance and evolution, component reuse, inspection, understanding).
- Increase of sharing and interoperability of models created by stakeholders.
- Assistance with interface semantics and software architecture descriptions.
- Help in identification and reuse of existing components.

Motivated by the advantages of the ontology-based approaches, a new software development paradigm emerged. This paradigm was named as Ontology-Driven Architecture (ODA). This paradigm combines the ontological engineering with the Model Driven Development (MDD) specifications [19]. Even, the Object Management Group (OMG) proposed the Ontology Definition Metamodel (ODM) to combine the specifications of both paradigms. Some benefits of ODM specification include [20]:

- Options in the level of expressivity, complexity, and form available for designing and implementing conceptual models, ranging from familiar UML and ER methodologies to formal ontologies represented in description logics or first order logic.
- Grounding in formal logic, through standards-based, model-theoretic semantics for the knowledge representation languages supported, sufficient to enable reasoning engines to understand, validate, and apply ontologies developed using the ODM.
- Profiles and mappings sufficient to support not only the exchange of models developed independently in various formalisms but to enable consistency checking and validation in ways that have not been feasible to date.
- The basis for a family of specifications that marry MDA and Semantic Web technologies to support semantic web services, ontology and policy-based communications and interoperability, and declarative, policy-based applications in general.

ODM-based ontologies can be used to support [20]:

- Interchange of knowledge among heterogeneous computer systems;

- Representation of knowledge in ontologies and knowledge bases;
- Specification of expressions that are the input to or output from inference engines.

### III. APPLYING ONTOLOGIES TO SUPPORT THE SOFTWARE DEVELOPMENT PROCESS

In this section some ontology-based approaches to support some stages of the software lifecycle are analyzed. The ontologies have been applied not only to support the engineering activity, but has been used to support different dimensions in software projects, such as project management tasks. Likewise, we analyzed some examples where the ontologies have been applied to support the knowledge management in different domains.

#### A. *Ontology-based approach to support the business process modeling and assessment*

This proposal aims to describe an ontological model to assess business process descriptions [21]. The assessment is based on practical guidelines to check the structural properties and the understandability of models [22, 23]. Some specifications to automatically apply these guidelines in the ontology were implemented. This ontology includes classes to represent the main concepts related to a process, such as **Activity**, **Gateway**, **Event**, etc. Likewise includes object properties to relate individuals, for example the object property *IsActivityOf* allows to specify that an instance of the class **Activity** *IsActivityOf* an instance of the class **Process**. The object property *FollowsTo* allows to represent the activity flow. In addition, some classes to classify the processes based on the practical guidelines are included. For example, **ProcessWithSizeProblem**, **ProcessWithMorfologyProblem**, **ProcessEfficient**, **ProcessInefficient**, **ProcessVeryInefficient**, etc.

#### B. *Ontology-based approach to represent software architecture*

An ontology-based approach was developed to support the software architecture description[24]. After studying models of architectural views, the authors found that there are problems related to the traceability, consistency of the models is not correctly checked, there is redundancy in the information and the elements that compose the models are not described to be reused. To deal with these issues, an ontology was developed with the objective of favoring the description of the software architecture. The result of the research offers the possibility of describing the software architecture with a formal language such as ontologies, which can later be interpreted by other tools. It reduces the errors introduced in the manual descriptions. It is a tool to help in the formation of human resources, because in the ontology the knowledge necessary to describe and understand software architectures is defined. In addition, this knowledge can be used by inexperienced architects or in future research.

#### C. *Ontology-based approach to support the transformation of business process models to system component models*

This works presents a proposal to automatically generate component models from business process models [2]. This approach combines the Model Driven Development (MDD) paradigm with the ontological engineering. In this case, both the business process model and component model are repre-

sented by means of ontologies. In both ontologies are included some mechanisms to support the model validation. This proposal contributes to enhance the consistency of both models as well as the traceability of business concepts through different stages of the software lifecycle. This proposal takes into account the business entities to create the business process model. This is a relevant feature to achieve the transformation from business process models to system models. In addition, this proposal demonstrated the potentialities of ontologies to represent models at different abstraction level during the software lifecycle.

#### D. Ontology-based approach to support the management of design decisions

This work presents an ontology based method to describe and analyze design decisions [25]. After identifying the main type of design decisions by reviewing the literature and surveying software developers, the authors created an ontology to represent these types of design decisions. This ontology includes classes to represent the decisions as well classes to represent the software artefacts that are related to the decisions. Likewise, some classes are included to describe the actors that participated in the design decisions. To link all those concepts, a group of object properties were included in the ontology. With the systematic application of this method the knowledge base will grow and may be a useful instrument for designers and architects for making decisions during the development of a software. Fig. 1 shows the general view of this method.

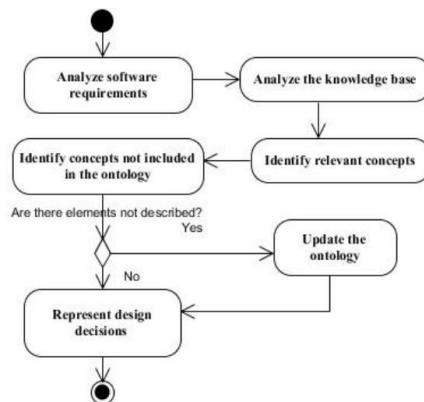


Fig. 1. General view of the method [25]

#### E. Ontology-based approach to represent and analyze information related to Code Smells

This work introduces an ontology-based approach to represent and analyze the knowledge about Code Smells (CS) [26]. This ontology may be a useful instrument to train architects and programmers. In addition, it will enable the consistency checking of the information represented in the scientific literature with the aim of providing suitable technical support to the software development professionals involved in the software development. The ontology was used to represent some of the most common CSs which are widely documented in the specialized literature. Besides, the ontology includes classes and properties to specify the relation of CSs to different quality characteristics. Hence, the ontology has a wide scope, making possible the representation of numerous concepts related to the software development process.

#### F. Combining ontologies and relational databases

Ontologies have been used as a data model or to complement other type of data representation. For example, since it is complex to store semantic knowledge in relational databases, the ontologies can address this limitation. Especially because ontologies have a richer semantic and are closer to the end user vocabulary than relational database schemas. Different scenarios where relational databases and ontologies are linked to provide a better integration, query, and visualization of stored data were analyzed in a literature review [27]. They identified six scenarios:

- Mapping relational databases to ontologies and vice versa.
- Ontologies for integrating heterogeneous data sources.
- Ontology-based data access (OBDA).
- Ontology-based natural language queries.
- Ontological learning from relational databases.
- Semantic contribution through ontologies.

The analysis revealed that the mapping of relational databases to ontologies and the ontologies usage for the integration of heterogeneous data sources were the most common scenarios. Related to the first scenario, different methods to integrate ontologies with relational databases have been developed.

#### G. Ontology-based approaches to support the representation and analysis of information in different domains

Ontologies have been used to represent and analyze information in a wide variety of domains [1-7]. Recently several ontologies have been proposed to represent knowledge related to Covid-19. For example:

- Long COVID Phenotype Ontology (<https://bioportal.bioontology.org/ontologies/LONGCOVID>) represents information to analyze long covid-19 patients.
- COKPME – COVID19 Ontology (<https://bioportal.bioontology.org/ontologies/COKPME>) describes the relative and precautionary measures that can be put in action for controlling the spread.
- Covid19 Impact on Banking Ontology (<https://bioportal.bioontology.org/ontologies/COVID19-IBO>) provides semantic information about the impact of the COVID -19 on the banking sector of India.

Likewise, an ontology focused mainly on analyzing the contagion chain was developed [28]. This ontology includes specifications to track the contagion chains and provide interesting insights for the experts in order to know better this disease. This approach could be a useful tool to support the epidemiological work, especially in countries where a rigorous monitoring of contagion chains has proven to be an effective strategy to contain the virus. Fig. 2 and Fig. 3 depict the hierarchy of the classes **Person** and **Contagion\_Chain**, two of the main classes in this ontology. The ontology includes specifications to automatically classify the instances of the class **Contagion\_Chain** according to their characteristics.



Fig. 2. Hierarchy of the class **Person** [28]

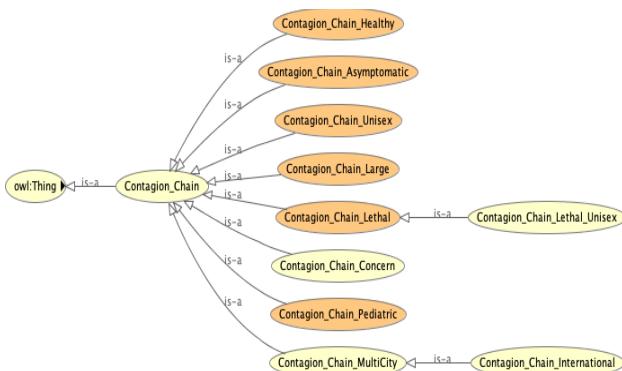


Fig. 3. Hierarchy of the class **Contagion\_Chain** [28]

These ontologies are focused on the domain side, but they can be used as an artefact to develop a software. For example, an ontology-based method was developed to assist the specialists in the banking domain [29]. Specifically for the process of risk evaluation. This ontology is integrated with credit scoring systems based on relational databases. The method was applied in the development of a system for the evaluation of credits in the National Bank of Cuba for which two application ontologies were developed that allowed independently classify the financial indicators and the risk of credit applications.

#### IV. CONCLUSIONS

In this paper the potentialities of the ontologies have been described by analyzing a set of ontologies-based approaches. The approaches illustrate how the ontologies can be exploited to support different engineering activities during the software development process, such as, business process modeling, software architecture description, code smell analysis, etc. Likewise, examples of the application of ontologies in different domains were analyzed, for example to analyze information related to Covid-19. We consider that the new challenge of the software engineering and the ontology communities is to create approaches combining all these ontologies to ensure the consistency of the information as well as the traceability of the software artefacts. In addition, the integration of ontologies with information systems to support automatic tasks is another interesting research direction.

#### REFERENCES

1. Xinga X., et al. Ontology for safety risk identification in metro construction // Computers in Industry. – 2019. – 109. – P. 14-30.
2. Silega N., Noguera M., and Macias D. Ontology-based Transformation from CIM to PIM // IEEE Latin America Transactions. – 2016. – 14 (9). – P. 4156-4165.
3. Yang L., Cormicana K., and Yub M. Ontology-based systems engineering: A state-of-the-art review // Computers in Industry. – 2019. – 111. – P. 148-171.
4. Vences Nava R., Menendez Dominguez V.H., and Gomez Montalvo J. A document recommendation system using a document-similarity ontology // IEEE Latin America Transactions. – 2016. – 14 (7). – P. 3329-3334.
5. Freitas S., Canedo E., and Jesus D. Calculating similarity of curriculum lattices // IEEE Latin America Transactions. – 2018. – 16 (6). – P. 1758-1764.
6. Silega N. and Noguera M. Applying an MDA-based approach for enhancing the validation of business process models // Procedia Computer Science. – 2021. – 184: – P. 761-766.
7. Keet C.M. and Grütter R. Toward a systematic conflict resolution framework for ontologies // Journal of Biomedical Semantics. – 2021. – 12 (1).
8. Noy N.F. and McGuinness D.L. Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology. 2001, Stanford Medical Informatics: Stanford.
9. Yang C., et al. An Ontology to Standardize Research Output of Nutritional Epidemiology: From Paper-Based Standards to Linked Content // Nutrients. – 2019. – 11 (6). – P. 1300.
10. Magumba M.A. and Nabende P. An ontology for generalized disease incidence detection on twitter // in International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems. – Springer, 2017.
11. Amith M., et al. Friend of a Friend with Benefits ontology (FOAF+): extending a social network ontology for public health // BMC Medical Informatics and Decision Making. – 2020. – 20 (10). – P. 1-14.
12. Slimani T. Ontology development: A comparing study on tools, languages and formalisms // Indian Journal of Science and Technology. – 2015. – 8 (24). – P. 1-12.
13. Corcho O., Fernández-López M., and Gómez-Pérez A. Methodologies, tools and languages for building ontologies. Where is their meeting point? // Data & knowledge engineering. – 2003. – 46 (1). – P. 41-64.
14. Musen M.A. The protégé project: A look back and a look forward // AI Matters. – 2015. – 1 (4). – P. 4-12.
15. Kumar M.K. Creation of Dynamic Ontologies for Graphical Representation in User Interface using NeOn in Shodhganga. in ETD2017 Symposium. 2017.
16. Kotis K.I., Vouros G.A., and Spiliotopoulos D. Ontology engineering methodologies for the evolution of living and reused ontologies: status, trends, findings and recommendations // The Knowledge Engineering Review. – 2020. – 35: – P. e4.
17. Suárez-Figueroa, M.C., et al. Ontology engineering in a networked world // Ontology Engineering in a Networked World. – 2012. – P. 1-435.
18. Sattar A., et al. Comparative analysis of methodologies for domain ontology development: A systematic review // Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl. – 2020. – 11 (5). – P. 99-108.
19. W3C E.P.T., Jeff Z. Pan, Daniel Oberle, Evan Wallace, Michael Uschold, Boeing, Elisa Kendall. Ontology Driven Architectures and Potential Uses of the Semantic Web in Systems and Software Engineering. 2006 Editors' Draft Date: 2006/02/11 [cited 2011 6 de febrero]. Available from: <http://www.w3.org/2001/sw/BestPractices/SE/ODA/>.
20. OMG, Ontology Definition Metamodel. 2014.
21. Olga Y. Rojas, et al. An Ontological Model to Support the Application of Quality Practical Guidelines to Assess Business Process Descriptions, in Futuristic Trends in Networks and Computing Technologies. – Springer Nature: India, 2021.
22. Flavio Corradini, A.F., Fabrizio Fornari, Stefania Gnesi, Andrea Polini, Barbara Re, Giorgio Orzono Spagnolo. Quality Assessment Strategy: Applying Business Process Modelling Understandability Guidelines. 2017: Italia.

23. *Sánchez-González, L., et al.* Quality assessment of business process models based on thresholds // in OTM Confederated International Conferences" On the Move to Meaningful Internet Systems". – Springer, 2010.
24. *Sánchez M.A., et al.* ONTOARQS: Una ontología para describir arquitectura de software // in IX Taller Internacional de Calidad en las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. "CALIDAD 2020". – Habana, Cuba, 2020.
25. *Cruz Segura Y., et al.* Description and analysis of design decisions: an ontological approach // in International Conference on Technologies and Innovation. – Springer, 2018.
26. *Betancourt I.C., et al.* Exploiting an Ontology-Based Solution to Study Code Smells // in International Conference on Futuristic Trends in Networks and Computing Technologies. – Springer, 2020.
27. *López Rodríguez Y.A., Hidalgo Delgado Y., and Silega Martínez N.* Escenarios de vinculación de las bases de datos relacionales y las ontologías: un mapeo sistemático // Enfoque UTE. – 2021. – 12 (4). – P. 58-75.
28. *Silega N., et al.* Exploiting an Ontological Model to Study COVID-19 Contagion Chains in Sustainable Smart Cities // Information. – 2022. – 13 (1).
29. *López Rodríguez Y.A., Hidalgo Delgado Y., and Silega Martínez N.* Método para la integración de ontologías en un sistema para la evaluación de créditos // Revista Cubana de Ciencias Informáticas. – 2016. – 10 (4). – P. 97-111.

# Интеллектуальное геомоделирование лесных экосистем

Вагизов Марсель Равильевич

Кафедра информационных систем и технологий

Институт леса и природопользования

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический

университет имени С.М. Кирова

Санкт-Петербург, Россия

bars-tatarin@yandex.ru

**Аннотация.** В основе представления информации о лесных экосистемах лежит принцип визуализации лесных тематических данных в удобном для восприятия лицу принимающему решений виде. Технологии интеллектуального анализа данных являются новым инструментом, редко применяемым в нынешнее время в отрасли лесного хозяйства. С другой стороны существуют технологии геомоделирования позволяющие представить крупные территориальные образования в виде геоинформационных моделей территории. Статья посвящена синтезу двух разделённых аналитических процессов о данных лесных экосистемах и возможности их комплексирования для получения синергетического эффекта в области управления лесным фондом.

**Abstract.** The presentation of information about forest ecosystems is based on the principle of visualizing forest thematic data in an easy-to-understand form for the decision-maker. Intelligent data analysis technologies are a new tool, rarely used at present in the forestry industry. On the other hand, there are geomodeling technologies allowing to present large territorial formations in the form of geoinformation models of the territory. The article is devoted to the synthesis of two separated analytical processes about forest ecosystems data and the possibility of their combination to obtain a synergistic effect in the field of forest management.

**Ключевые слова:** геоинформационное моделирование, интеллектуальная обработка данных, лесные экосистемы

**Keywords:** geoinformation modeling, intelligent data processing, forest ecosystems.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Технологии обработки геопространственной информации в сочетании с методами машинного обучения открывают новые возможности в визуализации данных лесных экосистем. К таким возможностям можно отнести следующие компоненты;

1. Визуализация графической модели лесной экосистемы на крупные территориальные образования.
2. Интеграция гетерогенных данных в единую модель.
3. Отображение поддеревной информации о выбранной местности.
4. Отображение анализа данных по таксационным выделам с трёхмерным отображением древостоя.

5. Экосистемное разделение территории на слои данных в виде отдельных комплексов данных (почва, тип лесорастительных условий).

6. Интеллектуальная обработка информации на базе комплексирования информации и методов машинного обучения.

## II. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основе методов исследования использовались технологии проектирования трёхмерных моделей при помощи инструментов моделирования и визуализации в Blender. Для обработки таксационных данных использовались библиотеки машинного обучения Keras и NumPy.

Существует два разделённых аналитических процесса анализа данных о лесных экосистемах. Первый процесс это анализ таксационных данных, то есть анализ баз данных в виде таблиц и извлечение нужных данных по сформированным запросам. Второй процесс это анализ картографической информации на основе обработки лесных тематических данных в виде двухмерных карт использующихся в лесном хозяйстве по нынешнее время.

Задача интеллектуального геомоделирования лесных экосистем сводится к технологическому синтезу двух составляющих. В работах [1, 2] существует описание технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем. Для дополнения общей концепции по обработке информации в составе системы моделирования необходим программный компонент, отвечающий за обработку и визуализацию таксационных данных. Таким компонентом может выступить отдельный программный модуль, подключенный к геоинформационной системе (ГИС).

Интеллектуальный анализ данных подразумевает под собой обработку данных, основанную на связи и одновременного отображения графического представления леса и полученных данных таксации насаждений. На основе такой модели возможным становится комплексное восприятие информации о лесе и наиболее полная оценка ситуации. Второй составляющей такого метода представления информации является моделирование и визуализация прогнозируемых параметров лесной экосистемы. Сложность интеграции таких данных состоит в том что, как правило, поставка данных осуществляется в устаревших форматах, как правило, в текстовых форматах txt, она требует преобразования в более

подходящие форматы данных для обработки лесоустроительной информации. Зачастую такие данные преобразовываются в табличные редакторы (Access или Excel) для их чтения как базу данных и последующего импорта в среду в ГИС. Но даже в геоинформационных системах отображение базы данных таксации насаждений и визуализации лесных тематических карт это два отдельных диалоговых процесса.

дата	состав	возраст	ярус	диаметр
30	6 3Е	-90	1	23
31	01.авг 2Е	-140 --		27
32	2005 3Б			26
33	20с	-90		28
34	Подрост: 10Е 30 лет, высота 5.0 м, 3.0 тыс.шт/га			
35	Тип повреждения: ветровал, 1996 год,			
36	степень повреждения сильная			

Рис. 1. Пример преобразованных таксационных данных в формат xls

Для начала в структуре таксационной информации требуется произвести очистку данных от излишних, дублирующихся и ошибочных данных, это позволит наиболее точно обработать данные при помощи библиотек машинного обучения (рис. 1).

После обработки и процедуры очистки, данных мы можем приступить к импорту и визуализации данных в библиотеках машинного обучения. Здесь подход в обработке информации многообразен, использовать возможно абсолютно различные библиотеки, к наиболее распространенным библиотекам к задаче интеллектуального анализа подойдут: Keras, Numpy, Pandas, Scikit-learn.

Интеллектуальный анализ таксационной информации сводится не только к визуализации текущих данных, но и к задачам предсказания основных таксационных показателей:

- диаметра ствола;
- породного состава;
- высоты древостоя;
- среднего диаметра;
- бонитета леса;
- класса возраста.
- Запаса древесины на га.

В научной работе [3] описываются возможности использования и применения, например Ансамблевых методов машинного обучения. В ходе выполнения исследования различные модели тестируются для решения одной задачи, в рамках выполнения обработки таксационной информации это может быть задача предсказания роста древостоя с течением времени и получения будущих таксационных показателей, с целью определения производительности будущего древостоя. Решение и визуализация данной задачи будет интересна как арендаторам земель лесного фонда, так и государственным лесничествам с целью контроля декларируемых данных.

В результате анализа, графически пользователю выводятся информационные сообщения в виде различных графиков, это могут быть как отдельные графики по от-

дельному элементу обработки таксационной информации, так и совмещённые графики результирующие результат обработки (рис. 2).

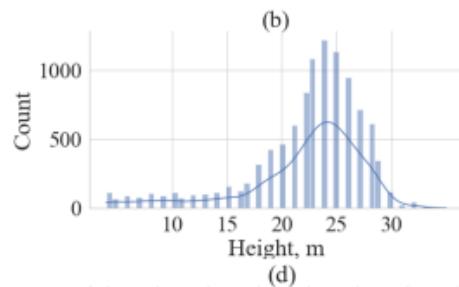


Рис. 2. Результат работы визуализации данных в библиотеке Scikit-learn

Второй составляющей процесса отображения обработанных данных является процесс геомоделирования территории. Геомоделирование – это процесс построения в моделируемой среде пространства с входящими в него физическими объектами, который позволяет проводить анализ структуры и взаимосвязи с входящими в него компонентами. Построенная таким образом модель позволяет на когнитивном уровне воспринимать географическую информацию более детально, поскольку в такой модели присутствует трёхмерная визуализация данных, наиболее приближенная к естественному способу отображения информации.

Столицей отметить, процесс геомоделирования разделён от проектирования отдельных трёхмерных объектов. В настоящее время существуют отдельные программные продукты, в которых детально создаются 3-D объекты, после чего, они могут быть интегрированы в состав ГИС.

Для процесса геомоделирования используется наиболее подходящая среда работы с компьютерной графикой, в нашем исследовании применялся программный продукт Blender. В нём была построена модель лесного участка, на которую имеются таксационные описания, обработанные при помощи методов машинного обучения. Результат визуализации геомоделирования представлен на рис. 3. Технологии геоинформационного моделирования активно используются в Науках о Земле при моделировании природно-технических систем и агроландшафтов [4, 5].



Рис. 3. Модель территории учебно-опытного лесничества филиала СПбГЛТУ имени С.М. Кирова

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования нами была произведена обработка таксационной информации учебно-опытного лесничества при помощи методов машинного обучения,

сформирована геоинформационная модель территории. Для интеграции данных двух составляющих интеллектуального анализа геоинформационной модели лесной экосистемы необходимо сделать вывод, о целесообразности разработки комплексного программного продукта, сочетающего в себе процесс визуализации территориальных единиц лесного фонда и одновременного отображения таксационной информации по выбранной территориальной единице. Прототип такого способа отображения информации представлен на рис. 4.

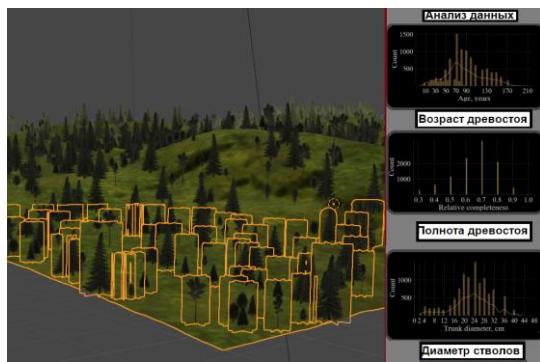


Рис. 4. Анализ данных по выбранному фрагменту геоинформационной модели лесной экосистемы

Способ отображения, где представлены две составляющие геоинформационная модель лесного участка, и его таксационная информация является наиболее удобным и совмещающим в себе комплексные данные физическое представление и характеристики древостоя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вагизов М.Р. Разработка технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем (часть 3) // Геоинформатика. – 2022. – № 2. – С. 34-41. – DOI: 10.47148/1609-364X-2022-2-34-41.
2. Вагизов М.Р., Истомин Е.П. Разработка технологии геоинформационного моделирования лесных экосистем (часть 2) // Геоинформатика. – 2022. – № 1. – С. 40-46. – DOI: 10.47148/1609-364X-2022-1-40-46. – EDN ZHFRMC.
3. Vagizov M., Potapov A., Navalikhin S. [et al.]. Application of ensemble machine learning methods for modeling the heights of individual forest elements based on inventory data processing // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2, Saint Petersburg, Virtual, 18–19 марта 2021 года. – Saint Petersburg,
4. Ольшевский А.В. Геоинформационное моделирование белорусского полесья // Вестник БГУ. Сер. 2. – 2009. – № 2. – С. 71-75.
5. Носонов А.М., Пашков С.В. Геоинформационное моделирование перетоков знаний в сельском хозяйстве России // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2019. – Т. 5 (15). – № 3. – С. 303-314.

# Представление схем реляционных баз данных на основе применения нотаций концептуальных графов

Власенко Сергей Владимирович  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
Санкт-Петербург, Россия  
*s\_v\_vlasenko@mail.ru*

**Аннотация.** Настоящий доклад посвящен проблеме прикладного использования аппарата концептуальных графов (КГ) в современных технологиях распределенной обработки данных и знаний. Основное внимание уделено решению частной задачи эффективного представления и обработки реляционных баз данных (БД) с применением нотаций КГ. При этом акцент делается на технологических аспектах интеграции БД выбранного класса в интеллектуальные информационные системы и технологии, оснащенные инструментами работы с КГ.

**Abstract.** This report is devoted to the problem of effective use of the conceptual graph (CG) theory in modern technologies of distributed data and knowledge processing. The main attention is paid to solving the particular problem of efficient representation and processing of relational databases (DB) using CG notations. At this, the emphasis is on technological aspects of chosen-class DB integration into intelligent information systems and technologies equipped with tools for working with CG.

**Ключевые слова:** концептуальные графы, системы, основанные на знаниях, модели знаний, инженерия знаний.

**Keywords:** conceptual graphs, knowledge based systems, knowledge models, knowledge engineering.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Весьма актуальными в настоящее время являются исследования в области M2M-технологий и «Разумного Интернета». Процессы цифровой трансформации неизбежно увеличивают интерес к повышению уровня интеллектуализации информационных и автоматизированных управляющих систем в самых разнообразных приложениях. Одной из наиболее востребованных при этом можно назвать проблемную область интеллектуальной обработки распределенных данных и знаний. Масштабные работы в соответствующих направлениях ведутся в рамках программы консорциума W3C Semantic Web, проекта Common Logic (под эгидой ISO/IEC) и других международных, национальных и коммерческих программ и проектов.

В прикладном плане наиболее развитый стек технологий на текущий момент предоставляет программа Semantic Web, опирающаяся на аппарат онтологий и инструментарий RDF/RDFS, OWL, SPARQL, SWRL и др.

Однако, данные технологии имеют и существенные ограничения, вызванные рядом принципиальных «слабостей» онтологического подхода. К числу подобных недостатков можно отнести сугубо декларативный характер моделей (отсутствие императивной составляющей или ее представление внешними по отношению к модели средствами), малую выразительную мощность, ограниченность механизмов логического вывода на онтологиях и др.

Между тем, возможны и альтернативные подходы к организации представления и обработки данных и знаний, которые, как представляется, имеют больший потенциал развития и достижимых функциональных возможностей в сфере интеллектуальных информационных систем и технологий. К данной категории относится и рассматриваемый далее подход на базе применения аппарата концептуальных графов (КГ).

## II. АППАРАТ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ ГРАФОВ В СТАНДАРТЕ CL

Пик популярности теории КГ и основанных на КГ методах концептуального моделирования в научном сообществе пришелся, вероятно, на 90-е и начало 2000-х годов ([1-4]). Однако тогда данное направление исследований не нашло надлежащей поддержки в среде крупных производителей программного обеспечения, и выбор был сделан в пользу онтологического подхода. Новым импульсом к развитию аппарата КГ стало появление в 2007 г. стандарта ISO для так называемой «общей логики» (Common Logic – CL) – ISO/IEC 24707:2007 («Information technology – Common Logic (CL): a framework for a family of logic-based languages»). Последняя редакция стандарта датирована 2018-м годом ([5]).

С точки зрения функциональной характеристики CL показательны содержащиеся в данном стандарте требования к «общей логике». В соответствии с ними CL должна:

1) включать полную логику первого порядка, то есть, синтаксис и семантика CL должны обеспечивать полный спектр синтаксических форм логики первого порядка с их обычными значениями (соответственно, любой традиционный синтаксис логики первого порядка будет непосредственно переведен в CL без потери информации или изменения смысла);

2) обеспечивать синтаксис общего назначения для передачи логических выражений, то есть:

а) должен существовать единый синтаксис XML для передачи общего логического содержимого в Интернете;

б) языки CL должны быть способны выражать различные часто используемые синтаксические расширения для логических форм или часто используемых шаблонов логических предложений;

с) синтаксис CL должен соответствовать существующим соглашениям; в частности, он должен быть способен отображать любой контент, выражаемый в RDF, RDFS или OWL;

д) должен быть определен, по крайней мере, один удобочитаемый синтаксис представления, который можно использовать для выражения всего языка;

3) обеспечивать простоту и «естественность» для использования в Интернете, то есть:

а) синтаксис XML должен быть совместим с опубликованными спецификациями для XML, синтаксисом IRI (Internationalized Resource Identifier), схемами XML, Unicode и другими соглашениями, относящимися к передаче информации в Интернете;

б) IRI должны использоваться в качестве имен в языках CL;

с) IRI должны быть применимы к текстам заголовков и выражениям меток, чтобы облегчить веб-операции, такие как поиск, импорт и обслуживание перекрестных ссылок;

4) поддерживать открытые сети, а именно:

а) передача контента между агентами, использующими «общую логику», не должна требовать согласования синтаксических ролей символов или переводов между синтаксическими ролями;

б) любой фрагмент текста CL должен иметь одинаковое значение и поддерживать одни и те же последствия везде в сети; каждое имя должно иметь одинаковое логическое значение на каждом узле сети;

с) ни один агент не должен иметь возможности ограничивать способность другого агента ссылаться на что-либо или делать утверждения о чем-либо;

д) язык должен поддерживать способы ссылки на локальное пространство дискурса и быть способным соотносить ее с другими такими пространствами;

е) пользователи CL должны иметь право определять новые имена и использовать их в опубликованном контенте CL;

5) исключать какие-либо произвольные предположения о семантике, то есть:

а) CL не делает необоснованных или произвольных предположений о логических связях между различными выражениями;

б) если возможно, агенты CL должны выражать эти предположения непосредственно в CL.

Таким образом, можно констатировать, что «общая логика» исходно ориентирована на поддержку логических преобразований в рамках межмашинных взаимо-

действий, реализуемых посредством Интернета. Кроме того, семантика CL (и всех ее диалектов, включая нотации КГ) является супермножеством для языков Semantic Web (включая OWL и др.).

В стандарте «общей логики» регламентированы, в частности, 3 языка CL – CLIF (Common Logic Interchange Format), CGIF (Conceptual Graph Interchange Format) и XCL (eXtended Common Logic Markup Language). При этом важной особенностью стандарта является наличие абстрактного синтаксиса CL, в который корректно транслируются все нормативные диалекты общей логики. Этот абстрактный синтаксис обеспечивает возможность формального взаимного перевода любых языковых конструкций CLIF, CGIF и XCL. Аналогичным образом организована в стандарте CL и спецификация нотации CGIF. Данная спецификация содержит описание «ядра» CGIF (Core CGIF) и его расширения (Extended CGIF), увеличивающего выразительность языка и облегчающего трансляцию в CGIF для естественных языков и других диалектов CL. Ядро CGIF является минимальным подмножеством диалекта, которое обеспечивает полное отображение семантики CL. Для Extended CGIF определено формальное приведение к семантике ядра CGIF, а соответственно, и к семантике CL в целом. Подобная структуризация синтаксических моделей открывает возможность создания выходящих за рамки стандарта расширений нотаций CGIF при условии корректного определения формальных процедур трансляции этих расширений в ядро CGIF. В свою очередь, интеграция аппарата КГ в CL обеспечивает совмещение выразительной мощности нотаций КГ с формальными логическими моделями и механизмами логического вывода. Это создает необходимые предпосылки для широкого внедрения КГ в технологии сематического поиска, распределенных логических вычислений, интеллектуальной обработки Big Data и т.п. Одним из направлений подобного применения аппарата КГ является распределенная семантическая обработка реляционных баз данных (БД), что и будет далее основным предметом рассмотрения.

### III. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КГ В ЗАДАЧЕ ОБРАБОТКИ РЕЛЯЦИОННЫХ БАЗ ДАННЫХ

Распределенная работа с аппаратом КГ может быть технически реализована на основе самых различных архитектур информационных систем. Для дальнейшего анализа примем в качестве базовой архитектуру абстрактного КГ-приложения в виде, представленном на рис. 1.

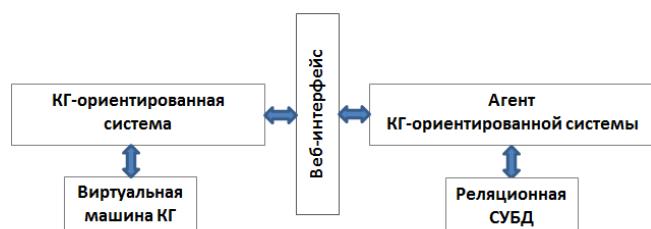


Рис. 1. Обобщенная структура приложения

В структуре на рис. 1 логика распределенной семантической обработки данных непосредственно реализуется в некоторой КГ-ориентированной системе, взаимодействующей (или интегрированной каким-либо иным образом, что не принципиально в данном случае) с вир-

туальной машиной КГ. На уровне физической манипуляции данными, хранящимися в целевой реляционной БД, смысл «семантической обработки» может сводиться либо к интеллектуальному формированию запросов к системе управления БД (СУБД), либо к интеллектуальной обработке результатов «обычных» прямых запросов, либо к совместному использованию двух указанных механизмов.

При этом возможны различные варианты распределения функций между базовым КГ-приложением и его агентом:

1. Базовое приложение формирует семантические запросы, которые транслируются агентом в форму, соответствующую специфике конкретной обрабатываемой БД;
2. Базовое приложение получает от агента информацию о некоторой локальной БД и на основе этой информации формирует прямой запрос (или серию запросов) к целевой реляционной СУБД.

В любом случае, если рассматривать в качестве субъекта взаимодействия реляционную СУБД, то эта СУБД будет работать в традиционном режиме, обслуживая поток обычных SQL-запросов, а обмен данными с ней будет поддерживать некоторая КГ-ориентированная среда, включающая в свой состав целевое интеллектуальное приложение. В указанной среде «входом» для механизма взаимодействия будет семантический запрос, который может быть представлен в виде КГ. Соответственно, на уровне абстрактных информационных моделей совместная работа КГ-ориентированной среды и реляционной СУБД может быть представлена в виде, изображенном на рис. 2.

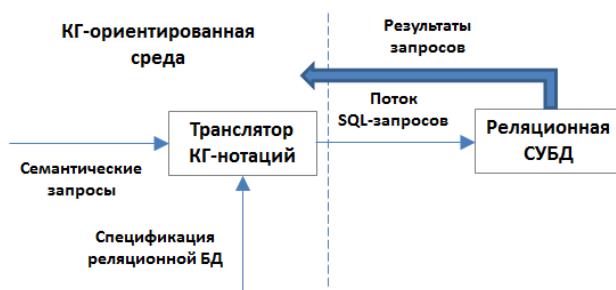


Рис. 2. Схема взаимодействий КГ-ориентированной среды и реляционной СУБД

Поскольку КГ способны представлять как декларативные, так и процедурные знания, естественным способом унификации средств описания, используемых в схеме на рис.2, является применение стандартных нотаций КГ и для спецификации семантических запросов, и для спецификации реляционной БД.

Как следует из общей схемы взаимодействий, функциональность семантических запросов определяется, в том числе, и свойствами спецификации БД. Остановимся подробнее на вопросах эффективного представления реляционных БД с применением стандартной для КГ нотации CGIF.

#### IV. СПЕЦИФИКАЦИИ РЕЛЯЦИОННЫХ БД НА ОСНОВЕ CGIF

Если исключить из рассмотрения прямое взаимодействие интеллектуального приложения со служебными ресурсами СУБД (работу со служебными атрибутами, авторизацию и т.п.), необходимым и достаточным условием корректной спецификации реляционной БД является адекватное представление схемы БД. При этом, однако, возникает целый ряд проблем, связанных как со спецификой отображения логических связей данных, так и со спецификой выбранного средства описания схемы БД – нотации CGIF. Далее рассматриваются следующие виды таких проблем:

1. Проблемы типизации данных.
2. Проблемы однозначного отображения различных видов логических связей между данными.
3. Проблемы представления ключей различных типов.
4. Проблемы применения различных (как стандартизованных, так и нестандартизированных, но широко используемых на практике) возможностей нотации CGIF.

##### A. Типизация данных

Отображаемое в виде таблицы БД реляционное отношение может быть описано совокупностью заголовка отношения (множества упорядоченных пар  $\langle a, t \rangle$ , где  $a$  – уникальное имя атрибута,  $t$  – имя типа атрибута) и множеством кортежей (упорядоченных троек  $\langle a, t, x \rangle$ , где  $a$  – имя атрибута,  $x$  – значение атрибута, имеющее тип  $t$ ). Для отображения в схеме БД достаточным является описание заголовка, который может быть представлен в КГ одним контекстом (см. рис. 3).

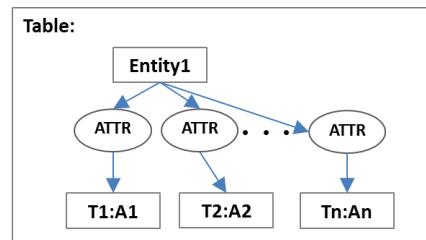


Рис. 3. Спецификация заголовка таблицы в виде КГ

На рис. 3 «Table» используется в качестве идентификатора типа, описывающего таблицу БД общего вида (при необходимости данная метка типа может быть заменена с целью указания на конкретный реализуемый в СУБД тип соответствующей таблицы). Концептуальное отношение «ATTR» является общепринятым обозначением атрибутивного отношения («быть атрибутом»).  $T_1$  и  $A_i$  – имена типов атрибутов и имена самих атрибутов (столбцов таблицы) соответственно. Концепт  $Entity1$  на рис.3 отображает сущность (реляционное отношение), характеризуемую таблицей, что условно соответствует имени таблицы. Здесь и далее для графического отображения КГ используется ненормативная, но широко применяемая в теории и технологиях КГ (включая текст стандарта CL) графическая нотация DF (Display Form). В нотации CGIF описание данного графа могло бы иметь следующий вид:

[Table: [Entity1: \*x] [T1: A1] (ATTR: ?x A1)  
 [T2: A2] (ATTR: ?x A2)  
 ...  
 [Tn: An] (ATTR: ?x An)]

Вопросы корректной спецификации типов T1...Tn в CGIF (и в CL в целом) являются открытыми, поскольку базовые типы данных в аппарате «общей логики» не регламентируются. Применимельно к синтезу адекватных SQL-запросов в трансляторе КГ-ориентированной среды указанное обстоятельство особого значения не имеет (разумеется, если не используются запросы на изменение данных и/или агрегирующие функции), однако, если в КГ-среде предполагается какая-либо постобработка результатов выполнения запроса, вопросы единой типизации данных могут вступить в силу. При этом выходом из ситуации, вероятно, можно считать введение (на уровне интерпретации в виртуальной машине КГ) требуемой номенклатуры обозначений типов данных, что не представляется значимым усложнением процессов обработки КГ и нотации CGIF.

Несколько сложнее выглядит обслуживание атрибутов, имеющих внутреннюю структуру или домен, описанный интервалом или конечным множеством возможных значений. В этом случае представляется необходимым применение независимой иерархии типов атрибутов, реализуемой в виде самостоятельного КГ, организованного по аналогии с иерархией типов концептов в спецификациях баз знаний ([6]). Подобный инструментарий отсутствует в стандарте CL, но содержался в эскизах стандарта ISO на КГ и на CGIF.

#### B. Межтабличные связи

Любая межтабличная связь может быть представлена в общем виде графом, изображенном на рис. 4.

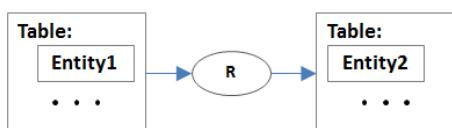


Рис. 4. Обобщенное представление межтабличной связи

На рис. 4 через R обозначено произвольное концептуальное отношение. Однако для обслуживания семантических запросов подобное описание должно быть дополнено характеристикой типа отношения с выделением классов «один-к-одному» (1:1), «один-ко-многим» (1:N) и «многие-ко-многим» (N:M), а также указанием на обязательность/необязательность связи для первых двух классов. Такая характеристика может быть задана в КГ различными способами:

- с использованием предопределенных классов отношений, имеющих известную и неизменную интерпретацию;
- с введением дополнительных описаний типов отношений по аналогии с иерархией типов отношений в регламентируемой нотации баз знаний ([6]);
- на базе механизма  $\lambda$ -выражений ([6]), т.е. на базе декларации и последующего использования «параметризуемых типов»;

- с прямым указанием на множественность значений тел реляционных отношений (множество кортежей) в концептах типа Table (что, впрочем, лишь частично решает проблему классификации межтабличных связей, требуя дополнительных уточнений для концептуального отношения R).

Здесь исходно следует отметить, что последние три из перечисленных выше подходов связаны с применением нерегламентированных в стандарте CL выразительных средств нотаций КГ. Несмотря на отсутствие видимых сложностей трансляции данных средств в ядро CGIF, на текущий момент подобные элементы являются ненормативными, что, тем не менее, не исключает их из дальнейшего рассмотрения.

Наиболее продуктивным выходом из ситуации с классификацией межтабличных связей представляется введение (предпочтительно – в каком-либо глобальном CGIF-дискурсе) пяти предопределенных типов концептуальных отношений (по одному для каждого из выделенных в настоящем разделе классов связей) с последующим отнесением R к одному из них (например, в виде отдельной спецификации в иерархии типов концептуальных отношений вида «R < PTi», где PTi – конкретный идентификатор одного из пяти указанных типов).

Дополнительно необходимо уточнить, что в случае принадлежности R к классу отношений «многие-ко-многим» в нормализованной БД для обслуживания генерации SQL-запросов потребуется спецификация дополнительной таблицы. Данный случай будет рассмотрен далее, при анализе спецификаций ключей.

#### C. Представление ключей

Наличие полной информации о ключах является необходимым условием корректной реализации процедур генерации и обработки результатов запросов к СУБД. В связи с этим отображение подобной информации в схемах БД следует считать обязательным. Рассмотрим отдельно представление внутренних (в том числе первичных) и внешних ключей.

Для принятой обобщенной схемы отображения заголовков таблиц (см. рис. 3) внутренний ключ, включающий некоторое подмножество атрибутов исходного реляционного отношения, может быть описан в КГ структурой, которая в общем виде представлена на рис. 5.

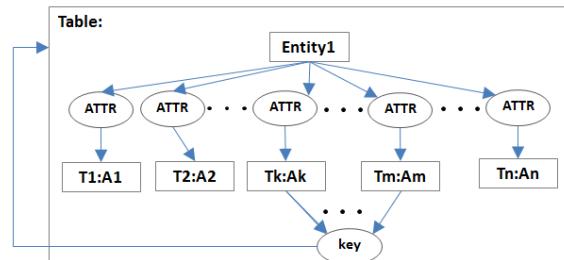


Рис. 5. Пример возможного представления внутреннего ключа

Соотнесение отношения «являться ключом» («key») с контекстом «Table» представляется более адекватным, чем альтернативные варианты, поскольку применительно к заголовку таблицы логично считать, что внутренний ключ индексирует именно таблицу в целом, а не описываемую ею сущность «Entity1» (которая представлена в КГ еди-

ничным концептом). Поскольку конкретное значение ключа также может иметь самостоятельный смысл, в целях унификации спецификаций ключей различных видов представляется возможным и выделение (для этого значения) нового концепта, как это показано на рис. 6.

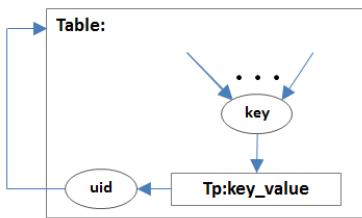


Рис. 6. Альтернативное представление внутреннего ключа

В данном варианте дополнительно введен концепт «значение ключа» («key\_value») и отношение уникальной идентификации экземпляров сущности (описываемой таблицей), которое условно названо на рис.6 «uid». Кроме того, можно отметить, что в рассматриваемом случае неопределенное отношение «key» логично заменить на актор (условно обозначим его «U»), отображающий объединение значений атрибутов, входящих в состав ключа. В нотации CGIF изображененная на рис. 6 структура потребовала бы внесения следующих изменений в тексте спецификации из параграфа (A):

```
[Table: ?z ...
    (U Ak, ...Am | key_value)
    [Tp: key_value]
    (uid *z ?key_value)]
```

При отображении *внешних ключей* в спецификациях межтабличных связей фигурирует сразу несколько таблиц. Одним из наиболее эффективных подходов к представлению анализируемого подкласса ключей при этом представляется использование кореферентных ссылок ([6]).

Рассмотрим данный подход на примере отображения отношения «многие-ко-многим» для таблиц Entity1 и Entity2, имеющих первичные ключи в полях pkey1 и pkey2 соответственно. Введем в задачу третью таблицу Links (таблицу связей) с двумя внешними ключами (например, k1 и k2), сопоставляемыми с выделенными ключами pkey1 и pkey2 в Entity1 и Entity2. Кореферентные связи в КГ (графически отображаемые в DF пунктирными линиями) могут указать на то, что связываемые ими сущности эквивалентны. Тогда получим следующее графическое описание (рис. 7).

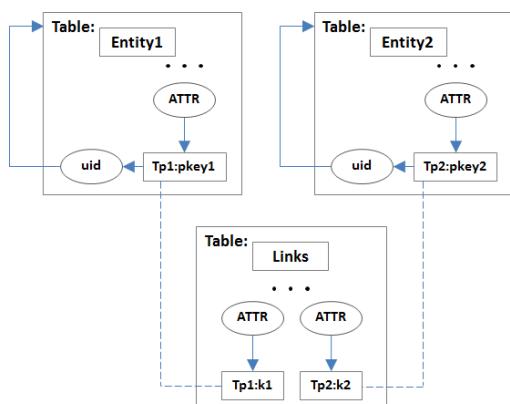


Рис. 7. Пример спецификации внешних ключей

КГ, приведенный на рис. 7, может быть описан на базе нотации CGIF, например, следующим образом:

[dbScheme:

```
[Table: ?z1 [Entity1: *x]...
    [Tp1: pkey1 *pk1]
    (uid *z1 ?pkey1)] ...
```

```
[Table: ?z2 [Entity2: *x]...
    [Tp2: pkey2 *pk2]
    (uid *z2 ?pkey2)] ...
```

```
[Table: [Links: *x]...
    [Tp1: k1 ?pk1]
    [Tp2: k2 ?pk2] ...]...
]
```

В случаях более сложной структуры внешних ключей всегда может быть использован описанный ранее подход, основанный на создании специального концепта (в предыдущем примере он был назван «key\_value») для прямого указания на значение произвольно сложного ключа. Этот концепт и становится далее субъектом кореферентной связи, обеспечивающей корректное отображение внешнего ключа в КГ.

#### D. Практическое применение выразительных средств нотации CGIF

В целом, спецификацию схем реляционных БД нельзя назвать особо сложным действием в плане привлечения выразительных средств аппарата КГ. Для решения соответствующих задач может использоваться достаточно ограниченный набор инструментов, доступных в нотациях КГ, что и было показано выше в разделах IV(A)-IV(C). Тем не менее, даже на уровне вопросов типизации данных и концептуальных отношений частично проявляются общие проблемы практического применения КГ и, в частности, нотации CGIF. Корень этих проблем, как представляется, связан с ограничениями средств аппарата КГ, принятymi в стандарте CL, и в неопределенности путей развития, стандартизации и внедрения инструментария CGIF, рассматриваемого в так называемом «Research CG» ([7]) – ненормативном расширении аппарата КГ, исследуемом и активно применяемом на практике в мировом научно-техническом сообществе. Среди элементов CGIF, входящих (или когда-либо входивших) в «Research CG», применительно к тематике обслуживания реляционных БД к числу наиболее «полезных» можно, вероятно, отнести следующие:

- базовые модели структуризации (в ранних версиях CGIF были определены множества «{ ... }» и последовательности «< ... >», которые могли использоваться и для объектов, и для типов);
- аппарат  $\lambda$ -выражений;
- специализированные контексты для спецификации типов (иерархии типов концептов и концептуальных отношений, каталог индивидов);
- развитый механизм обозначений (designator) в составе спецификаций концептов, включающий, в том числе, кодированные литералы с префиксом «%» (что можно было бы использовать, например, для классификации ключей и табличных индексов), локаторы различных видов (включая инди-

видуальные маркеры, особенно удобные при описании кросс-контекстных кореферентных связей), количественные квантификаторы и др.;

- расширенный набор теоретико-множественных и логических операций.

Помимо перечисленных выше элементов CGIF, в целях повышения эффективности спецификации и интерпретации КГ при работе со схемами БД и взаимодействиях с СУБД, возможно, был бы уместен и ряд доработок аппарата, которые широко не обсуждались в литературе по данной проблематике. К таким доработкам следовало бы отнести:

- формирование набора средств, необходимых для корректной спецификации и интерпретации базовых типов данных, используемых реляционными СУБД (а в более широкой трактовке – и стандартизованных базовых типов, принятых в других классах инструментального и системного программного обеспечения);
- создание инструментов работы с индексирующими множествами и последовательностями (в том числе – для поддержки структурирования данных в форме массивов, векторов, словарей и т.п.);
- введение поддержки механизма «областей видимости» и/или «пространств имен» для корректного обслуживания (в том числе, возможно, – на базе интеграции с IRI) внешних ссылок (включая «глобальные»);
- расширение номенклатуры предопределенных элементов языка CGIF (за счет типовых обозначений в концептах и контекстах, символов операций, служебных отношений и т.п.);
- стандартизацию DF.

Весьма перспективным представляется также организация единого открытого веб-ресурса, предоставляющего, в частности, доступ к библиотекам типовых спецификаций, к коллекциям профильных CGIF-текстов и КГ-ориентированных программных компонентов и инструментов (из категории «открытого программного обеспечения»), к показательным примерам использования нотации и т.п.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сематическая обработка реляционных БД на базе КГ была одной из первых проблемных областей, рассматривавшихся в сфере концептуального моделирования применительно к появлению аппарата КГ (см., например, [8]). Развитие данного аппарата для всей совокупности направлений исследований и практических применений достаточно полно систематизировано в работах [9, 10]. Тем не менее, различия «технологических контекстов», изменения нормативной базы и динамика развития само-

го аппарата КГ определяют неизменную актуальность новых теоретических и прикладных разработок, связанных с использованием нотации CGIF.

На основе предложенных в настоящей статье подходов, как представляется, может быть реализована, в том числе, и автоматизированная обработка БД выбранного класса с автоматическим анализом служебных сведений о схемах БД, предоставляемых большинством распространенных СУБД. Кроме того, «каркас» рассматриваемого подхода (например, в части атрибутирования сущностей, индексирования, связывания табличных объектов и в ряде других элементов) может быть распространен и на некоторые другие классы БД (нереляционные).

Соответствующие результаты будут использованы в инициативной разработке комплексов AIS и AIS-2 ([11,12]), ведущейся на кафедре Автоматики и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ», а также в развитии построенных на их основе технологий синтеза интеллектуальных управляющих систем и технологий распределенной обработки данных и знаний.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Mineau Guy W., Bernard Moulin, & John F. Sowa, eds. Conceptual Graphs for Knowledge Representation, Lecture Notes in AI 699. – Springer-Verlag, Berlin, 1993.
2. Ellis, Gerard, Robert A. Levinson, William Rich, & John F. Sowa, eds. Conceptual Structures: Applications, Implementation, and Theory, Lecture Notes in AI 954. – Springer-Verlag, Berlin, 1995.
3. Mugnier Marie-Laure, & Michel Chein, eds. Conceptual Structures: Theory, Tools, and Applications, Lecture Notes in AI 1453. – Springer-Verlag, Berlin, 1998.
4. Ganter Bernhard, & Guy W. Mineau, eds. Conceptual Structures: Logical, Linguistic, and Computational Issues, Lecture Notes in AI 1867. – Springer-Verlag, Berlin, 2000.
5. ISO/IEC 24707:2018 Information technology – Common Logic (CL): a framework for a family of logic-based languages. International Organisation for Standardisation (Second Edition).
6. Власенко С.В., Варчев Д.А. Использование аппарата концептуальных графов в задачах представления и обработки знаний: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. – 64 с.
7. Handbook of Knowledge Representation, ed. by F. van Harmelen, V. Lifschitz, and B. Porter, Elsevier, 2008. – P. 213-237.
8. Sowa John F. Conceptual Graphs for a Data Base Interface // IBM Journal of Research and Development. – 1976. – 20 (4). – P. 336-357.
9. John F. Sowa Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations, Brooks Cole Publishing Co., Pacific Grove, CA USA, 2000. – 594 p.
10. Michel Chein, Marie-Laure Mugnier: Graph-based Knowledge Representation - Computational Foundations of Conceptual Graphs // Advanced Information and Knowledge Processing. – Springer 2009. – P. 1-427. – ISBN 978-1-84800-285-2.
11. Управление и информационные технологии. Наука и образование. 2-е изд., доп. / под общ. ред. М.Ю. Шестопалова. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. – С. 142-154.
12. Vlasenko S., Efimenco G., Gnezdilov D., Brikova O. Approaches to Conceptual Graphs Notations Using in Digital Manufacturing Software Environments // Proceedings. 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2019 ElConRus). – P. 731-735. – DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8656842.

# Прогнозирование нештатных ситуаций в технологическом процессе помола цемента

**Кузенков Антон Николаевич**  
Центр нанотехнологий и материалов  
Республики Мордовия  
Саранск, Россия  
*kuzenkov@cnnrm.ru*

**Федосин Сергей Алексеевич**  
ФГБОУ ВО «Мордовский  
государственный университет  
им. Н.П. Огарёва»  
Саранск, Россия  
*fedosin@mrsu.ru*

**Моисеев Сергей Степанович**  
Санкт-Петербургская  
Цементная компания  
Санкт-Петербург, Россия  
*sales@nsicem.ru*

**Аннотация.** Выполнен анализ применимости классификатора данных для разработанной подсистемы контроля качества (КК) с использованием контрольных карт Шухарта (ККШ). Для осуществления эффективной классификации критических ситуаций обоснована целесообразность применения метода опорных векторов – support vector machine (SVM). Накоплена база возможных решений для особых случаев, соответствующих выходу показателей процесса производства цемента за контрольные пределы. Для программной реализации метода опорных векторов применена библиотека LIBSVM. Подробно описаны процедуры по подготовке накопленных данных для обучения моделей SVM. Подобраны оптимальные параметры ядер созданных моделей, обеспечивающие точность классификации. Созданы модели SVM для всех контролируемых параметров. Разработан человеко-машинный интерфейс отображения предлагаемых эффективных решений по предотвращению критических ситуаций, предназначенный для оператора.

**Abstract.** Author made the analysis of the classifier data for the developed system of quality control (QC) based on Shewhart control charts. For implement an effective classification of critical situations we justified target-conformity application of support vector. We accumulated the base of possible solutions in special cases when process of cement production go out from control limits. For pro-programmatic implementation of support vector we used library application LIBSVM. We described procedures for the preparation of the accumulated data for training models of SVM. We determined optimal parameters of created models nuclei to ensure accurate classification. We created SVM models for all monitored parameters. We created HMI display effective solutions to prevent critical situations for the operator.

**Ключевые слова:** контрольные карты Шухарта, помол цемента, статистическая управляемость, база знаний, контроль качества, машина опорных векторов, классификация, кросс-валидация.

**Keywords:** Shewhart control charts, grinding of cement, statistical controllability, knowledge base, quality control, support vector machine, classification, cross-validation

## I. ВВЕДЕНИЕ

Качество производимого цемента во многом определяет место и роль предприятия-производителя на современном рынке строительных материалов. Поэтому внедрение в АСУ цементного производства подсистем кон-

троля качества является актуальной задачей. Для ее реализации необходимо решить две взаимосвязанные подзадачи. Первая – распознавание (выявление) критических ситуаций, вызвавших нарушение в технологическом процессе (ТП). Вторая – собственно идентификация критической ситуации – для последующего исправления возможных отклонений в ТП. Теоретическим вопросам обеспечения качества продукции посвящено достаточно много работ. Однако практические вопросы их использования для сферы цементного производства остаются раскрытыми недостаточно полно. Поэтому в данной статье сделана попытка комплексно исследовать специфику применения методов управления качеством при производстве цемента.

## II. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ

Технологический процесс производства цемента можно разделить на несколько этапов. На первом этапе добывается сырье для производства цемента и дробится в сырьевых мельницах для подготовки к следующему этапу. На втором этапе полученная сырьевая смесь поступает в цементные печи, где происходит процесс обжига. На выходе печей получается так называемый клинкер, который на следующем этапе отправляется вместе с другими добавками в цех помола. После прохождения цементных мельниц получается готовый продукт – портландцемент [6]. Именно процесс помола цемента является наиболее важным с точки зрения контроля качества. Технологическая схема (рис. 1) иллюстрирует ТП помола цемента.

Клинкер вместе с добавками транспортируется в шаровую цементную мельницу, заполненную металлическими мельющими телами. После прохождения мельницы материал проходит через вращающиеся сепараторы, где осуществляется отбор мелких фракций полученного цемента (крупные фракции отправляются на повторный помол в цементную мельницу). В процессе помола мельница аспирируется с целью устранения пыления, удаления тепла и мельчайших фракций материала. Аспирация осуществляется от специальной установки, состоящей из вентилятора, рукавного фильтра или электрофильтра и осадительных циклонов (или аспирационной шахты). Аспирационная шахта-воздуховод системы подключается к верхнему фланцу приемной камеры, в

результате чего вся мельница находится под разрежением. Воздух засасывается через загрузочную камеру. Именно за счет этого воздушного потока фракции цемента перемещаются по цементной мельнице, а затем по аэрожелобам в силосы [8].

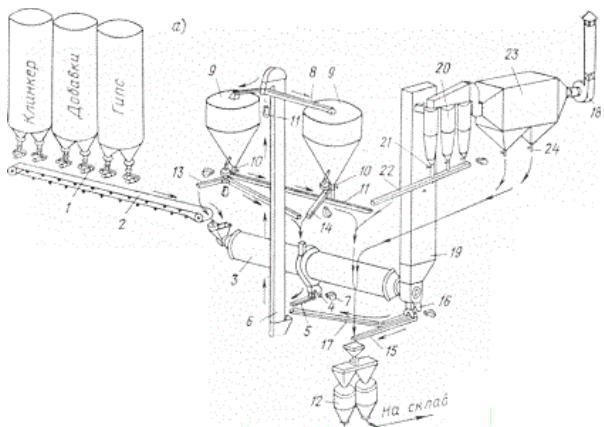


Рис. 1. Технологическая схема помола клинкера, гипса и добавок: 1 – дозаторы; 2 – ленточный транспортер; 3 – мельница; 6, 11, 17, 22 – аэрожелоба; 8 – фильтр сжатого воздуха; 9 – сепараторы; 10 – рукавный фильтр; 12 – силосы; 16 – камерный насос; 18 – вентилятор; 19 – аспирационная шахта; 20 – циклоны; 23 – электрофильтр

Контроль за процессом помола цемента осуществляется в специальном помещении, оборудованном несколькими мониторами, на которые выводятся мнемосхемы технологического производства. Оператор способен оказывать управляющие воздействия практически на любой этап процесса помола цемента. Он регулирует дозацию клинкера и добавок, частоту вращения ротора сепаратора, обороты вентилятора аспирационной системы (тем самым может изменять разреженность воздуха во всей системе помола). Однако в силу загруженности большим объемом информации с экранов оператор не всегда способен оперативно реагировать на критические ситуации в процессе помола, и в ряде случаев не может предвидеть возникновение таких ситуаций.

Для решения первой из задач, указанных во введении (распознавание критических ситуаций), был выбран хорошо зарекомендовавший себя на практике метод на основе контрольных карт Шухарта (ККШ) [3, 13]. Использование ККШ в составе АСУ ТП может обеспечить выявление изменений в ТП (в том числе выход процесса за пределы статистической управляемости) еще до того, как он достигнет аварийного состояния [9].

В [7] описывается экспериментальное внедрение подсистемы мониторинга и идентификации критических ситуаций в ТП на основе контрольных данных в ОАО «Мордовцемент». Для мониторинга были выбраны шесть характеристик.

- Удельная поверхность цемента (на единицу веса).
- Тонкость помола цемента, при просеивании через сито №008 (измеряется процент оставшегося материала на сите от общей массы просеиваемой пробы).
- Массовая доля в процентах ангидрида серной кислоты в цементе.

- Массовая доля опоки в цементе.
- Массовая доля оксида кальция в цементе.
- Процентное содержание влаги в цементе.

Для всех этих параметров согласно ГОСТ [4] существуют допустимые пределы, выход за которые говорит о наличии брака в произведенном цементе.

В результате исследования была разработана подсистема АСУ [7], отображающая ККШ в реальном времени. При помощи данной подсистемы оператор может отслеживать графики изменения во времени величин, определяющих качество цемента и в зависимости от отображаемой информации выполнять действия, которые занесены в диаграмму вариантов использования. Существует несколько правил для выявления потери статистической управляемости. Однако для практического применения ККШ достаточно использование первых четырех правил – это позволяет снизить вероятность ложных срабатываний [9]. На языке «С» был реализован скрипт, который следит за «срабатыванием» (выполнением) этих четырех правил. Они включают в себя следующее:

- правило 1 – выход одной точки, соответствующей показателю ТП, за трехсигмовые пределы;
- правило 2 – выход хотя бы двух из трех последовательных по времени точек, лежащих по одну сторону от центральной линии, за двухсигмовые пределы (центральная линия соответствует среднему значению показателя);
- правило 3 – выход по меньшей мере четырех из пяти последовательных точек, лежащих по одну сторону от центральной линии, за пределы одной сигмы;
- правило 4 – расположение по меньшей мере восьми последовательных точек по одну сторону от центральной линии [9].

В течение трёх месяцев тестирования подсистемы было обработано около 3000 значений для каждого контролируемого технологического параметра, т. е. всего около 10000 значений. За этот период времени ККШ для всех характеристик параметров выявили потери статистической управляемости по каждому из указанных выше четырех правил. Все принятые оператором эффективные решения для возвращения ТП в состояние статистической управляемости, а также параметры производственного процесса (температура, скорость вращения сепаратора и т.д.) были занесены в базу знаний – для формирования экспертной оценки по выявлению причин возникновения отклонений от ТП. Таким образом, стало возможным внедрение классификатора, который связывает накопленные данные в базе знаний с особыми событиями, ведущими к потере статистической управляемости. При этом в качестве входных данных используются значения параметров «1-6». Перспективным решением для данной задачи является использование классификатора на основе машины опорных векторов SVM [2].

Основная идея этого метода – перевод исходных векторов контролируемых параметров (соответствующих фактическим наборам показателей для определенного момента времени) в пространство более высокой размерности и поиск разделяющей гипер-

лоскости с максимальным зазором между ней и двумя параллельными гиперплоскостями, построенными по обеим ее сторонам (рис. 2).

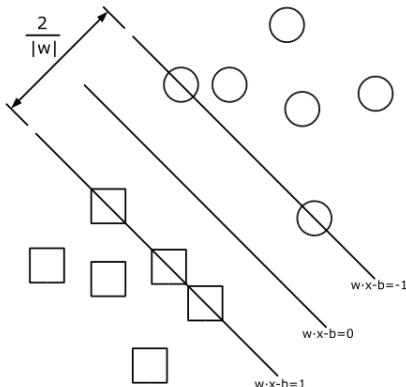


Рис. 2. Геометрическое изображение метода SVM

Математически обучающая выборка контролируемых параметров записывается в виде  $(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m), x_i \in R^n, y_i \in \{-1, 1\}$  [1,10]. Метод опорных векторов строит классифицирующую функцию  $F$  в виде:

$$F(x) = \text{sign}(\langle w, x \rangle + b), \quad (1)$$

где  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  – скалярное произведение,  $w$  – перпендикуляр к разделяющей гиперплоскости,  $b$  – равен по модулю расстоянию от гиперплоскости до начала координат. При этом объекты, для которых  $F(x) = 1$  попадают в один класс, а объекты с  $F(x) = -1$  – в другой. Такая функция используется потому, что любая гиперплоскость может быть задана в виде  $\langle w, x \rangle + b = 0$  для некоторых  $w$  и  $b$  (рис.2). Необходимо выбрать такие  $w$  и  $b$ , которые максимизируют расстояние до каждого класса. Можно показать, что данное расстояние равно  $1/\|w\|$ . Проблема нахождения максимума  $1/\|w\|$  эквивалентна проблеме нахождения минимума  $\|w\|^2$  и сводится к задаче оптимизации:

$$\begin{cases} \text{argmin} \|w\|^2 \\ y_i(\langle w, x_i \rangle + b) \geq 1, i = 1, \dots, m. \end{cases} \quad (2)$$

Она является стандартной задачей квадратичного программирования и решается аналитически с помощью множителей Лагранжа. При отсутствии линейной разделимости классов [1, 12], следует прибегнуть к расширению пространства за счет увеличения его размерности, выбирая для этого отображение  $\varphi(x)$  векторов  $x$  в новое пространство. При этом получается новая функция скалярного произведения:

$$K(x, y) = \varphi(x) \cdot \varphi(y). \quad (3)$$

Функция  $K(x, y)$  называется ядром. Она является базовым параметром для настройки SVM. С математической точки зрения ядром может служить любая положительно определенная симметричная функция двух переменных. Положительная определенность необходима для того, чтобы соответствующая функция Лагранжа в задаче оптимизации была ограничена снизу, т.е. задача оптимизации была бы корректно определена. Точность классификатора зависит, в частности, от выбора ядра. На практике встречаются (используются) следующие типы ядер:

- Полиномиальное:  $k(x, x) = (\langle x, x \rangle + \text{const})^d$ .

- Радиальная базисная функция (наиболее распространенный тип ядра):  $k(x, x) = \exp(-\gamma \|x - x\|^2)$ .
- Гауссова радиальная базисная функция:  $k(x, x) = e^{-\|x - x\|^2/2\sigma^2}$ .
- Сигмоид:  $k(x, x) = \tan(\langle x, x \rangle + c), k > 0, c < 0$ .

Программный модуль работы с картами Шухарта, при отсутствии статистической управляемости по конкретному технологическому параметру, выставляет соответствующую этому параметру переменную в единицу. Таким образом, подсистема контроля качества помогла цемента позволяет выявить, для какой технологической характеристики имел место особый случай. После этого осуществляется применение машины SVM. Она сначала распознает, по какому из 4-х правил была потрепана статистическая управляемость, т.е. относит случай к одному из четырех классов.

На втором этапе SVM определит по верхней или нижней границе (пределу) произошел выход показателя (параметра) процесса за пределы статистической управляемости, т.е. отделит один класс от другого. Диаграмма, показанная на рис. 3, иллюстрирует процесс классификации для каждого технологического параметра.

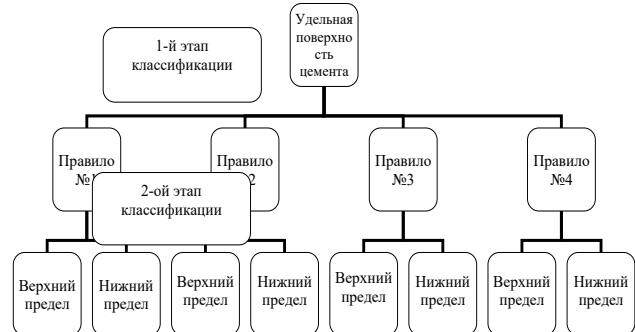


Рис. 3. Диаграмма, иллюстрирующая процесс использования классификатора на примере первого параметра ТП

### III. АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА

В качестве инструмента программной реализации данного метода было принято решение использовать свободно распространяемую библиотеку LIBSVM [11]. Для достижения наиболее эффективной классификации необходимо выполнить действия для подготовки наборов данных и поиска лучшего ядра для них, а именно сделать следующее.

Преобразовать числовые данные, соответствующие выходу ТП за пределы статистической управляемости, к формату информационной системы, использующей SVM.

- Провести шкалирование данных в диапазоне от 0 до 1 [11].
- Использовать ядро RBF:  $k(x, x) = \exp(-\gamma \|x - x\|^2)$ .
- Использовать перекрестную проверку для поиска наилучших параметров  $C$  и  $\gamma$ . Константа « $C$ » является управляющим параметром метода и позволяет находить компромисс между максимизацией расстояния между двумя гиперплоскостями и минимизацией суммарной ошибки.

- Использовать найденные значения  $C$  и  $\gamma$  для обучения модели с целью получения классификатора для конкретного технологического параметра.
- Провести проверку полученного классификатора на тестовом примере.

Все накопленные данные о выходе процесса из состояния статистической управляемости были приведены к формату LIBSVM и прошалированы в диапазоне от 0 до 1 – для обеспечения более точного обучения моделей (рис. 4).

```

1 1:0.3471 6:0.3321 17:0.3400
21:0.3465
2 2:0.3472 10:0.3521 18:0.3626
24:0.3621
3 3:0.3645 6:0.3678 17:0.3691
31:0.3699
4 2:0.3934 17:0.3865 22:0.3878
36:0.3812

```

Рис. 4. Фрагмент данных для обучения модели SVM

Формат данных для LIBSVM представляет собой строку вида: <label> <index>: <value>. Параметр <label> характеризует класс, к которому относятся следующие за ним значения. На первом этапе классификации требуется выявить, к какому из четырех правил потери статистической управляемости относится конкретный особый случай. Поэтому в тренировочном (обучающем) файле должны содержаться значения для четырех классов. Следует отметить, что при возникновении потери статистической управляемости по нескольким правилам одновременно, высший приоритет имеет правило №1, а низший – правило №4. Пара <index>: <value> дает характеристику значения контролируемого параметра. <index> – это целое число, начинающееся с «1» и увеличивающееся с каждым шагом. Параметр <value> – действительное число, отражающее значение выбранной характеристики, отшкалированное в диапазоне от «0» до «1».

При использовании ядра RBF осуществляется подбор как минимум двух коэффициентов – коэффициента регуляризации « $C$ » и параметра ядра « $\gamma$ ». Поскольку априорно оценить оптимальное значение этих параметров математическими методами невозможно, то на практике прибегают к эмпирической процедуре – перекрестной проверке (cross-validation или кросс-валидация). Суть данной процедуры заключается в следующем [11, 12].

- Задается диапазон, в пределах которого будут меняться значения параметров « $C$ » и « $\gamma$ » и шаг дискретизации для него. В результате получается «сетка», узлы которой задают набор пар значений « $C$ » и « $\gamma$ », среди которых необходимо выбрать оптимальную.
- Для каждой пары значений « $C$ » и « $\gamma$ » обучающая выборка разделяется на  $n$  частей. Одна из частей используется для обучения при данных значениях « $C$ » и « $\gamma$ », а другая часть – для тестирования. Данная процедура повторяется  $n$  раз (для получения более точного результата). В итоге каждая из  $n$  частей используется для тестирования; затем полученные значения усредняются. Процедура повторяется для всех значений сочетаний параметров « $C$ » и « $\gamma$ ».

Иногда вначале проводят кросс-валидацию с крупным шагом изменения « $C$ » и « $\gamma$ » для предварительной локализации лучшего решения. Затем в том промежутке (на том подинтервале), где были достигнуты наилучшие результаты, проводят кросс-валидацию еще раз, но с меньшим шагом.

Недостатком данного способа подбора параметров является большая вычислительная сложность и, как следствие, долгое время выполнения.

После проведения перекрестной проверки для каждой модели классификатора с помощью библиотеки LIBSVM были найдены наилучшие параметры « $C$ » и « $\gamma$ » для каждого случая. В рамках машинного обучения вводятся четыре статистические метрики для оценки качества работы классификатора [14, 15].

Все образцы, для которых классификатор выдал ответ, можно разделить на четыре группы:

- True positive – положительные результаты, верно найденные (определенные) классификатором как положительные.
- False positive – отрицательные результаты, неверно найденные (определенные) классификатором как положительные.
- True negative – отрицательные результаты, верно определенные классификатором как отрицательные.
- False negative – положительные результаты, неверно найденные (определенные) классификатором как отрицательные.

На основе этих 4-х статистических метрик библиотека LIBSVM выделяет метрику Accuracy =  $(\text{true positive} + \text{true negative}) / (\text{true positive} + \text{false negative} + \text{false positive} + \text{true negative})$ . В содержательном плане это соответствует доле (от «1») правильных ответов классификатора среди всех ответов. В ходе проверки обученных моделей SVM на тестовых данных этот показатель не опускался ниже 96,875 %.

В процессе помола цемента в случае потери статистической управляемости по какому-либо технологическому параметру подсистема извлекает решение из базы знаний (сформированной на основе мнений экспертов в области помола цемента), соответствующее выбору классификатора – такой выбор осуществляется в автоматическом режиме. После этого на дисплее оператора отображается совет по разрешению критической ситуации (рис. 5).

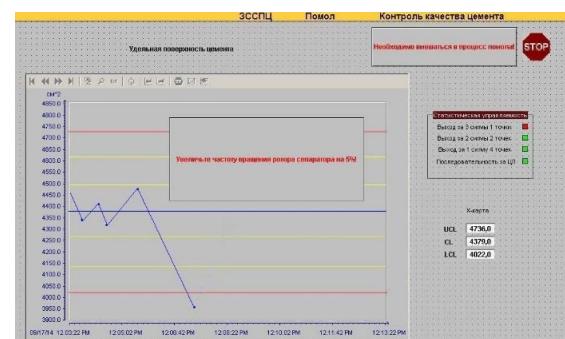


Рис. 5. Отображение совета при особом случае на экране оператора. Обозначения: UCL – верхняя граница для ККШ; LCL – нижняя; CL – центральная линия

Для всех параметров технологического процесса были сформированы базы знаний в отношении принятых эффективных решений (для каждого параметра в базу было внесено по 8 решений). Итак, для всех 6-ти параметров технологического процесса при возникновении особых случаев было определено 48 возможных решений (подклассов). Для каждого из 6-ти технологических параметров было создано по 5 моделей SVM. Первая модель при возникновении критической ситуации определяет, по какому из 4-х правил сработала ККШ. Затем, в зависимости от номера правила выбирается соответствующий ему классификатор (один из четырех). Выбранный классификатор определяет по верхнему или нижнему пределу произошел особый случай и связывает его с соответствующим решением в базе знаний (предлагаемых решений).

#### IV. Выводы

В ходе проделанной работы в подсистему контроля качества помола цемента с использованием ККШ был внедрен классификатор на основе метода опорных векторов. Для реализации классификатора использована библиотека LIBSVM. В ходе тестирования классификатора были подобраны оптимальные значения настроек моделей SVM. Это позволило обеспечить долю правильных ответов не ниже 96.875%. Доработанная с использованием предложенного классификатора подсистема контроля качества показала достаточную точность идентификации критических ситуаций и обеспечила повышение эффективности действий оператора, направленных на предотвращение таких ситуаций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Айвазян С.А. Прикладная статистика: классификация и снижение разнородности. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 342 с.
2. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. – М.: Наука, 1979. – 217 с.
3. ГОСТ Р 50779.42-99. Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. – Москва: Стандартинформ 1999. – 32 с.
4. ГОСТ 30515-97. Цементы. Общие технические условия. – Стандартинформ 1997. – 47 с.
5. Канне М.М., Иванов Б.В., Корешков В.Н., Схиртладзе А.Г. Системы, методы, и инструменты менеджмента качества. – СПб.: Питер, 2008. – 560 с.
6. Колокольников В.С. Производство цемента. – М.: Высшая школа, 1970. – 124 с.
7. Кузенков А.Н. Автоматизированная подсистема контроля качества цемента на основе использования карт Шухарта // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 4. – С. 134-144.
8. Теремецкий К.Н. Проектирование цементных и асбестоцементных заводов. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1964. – 165 с.
9. Уилер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами: пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. – 409 с.
10. Bartlett P., Shawe-Taylor J. Generalization performance of support vector machines and other pat-tern classifiers // Advances in Kernel Methods. – MIT Press, Cam-bridge, USA, 1998. – С.43-54.
11. Chang C.-C. and Lin C.-J. LIBSVM: a library for support vector machines. – 2001. – Режим доступа: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>. (дата обращения 15.08.2015), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
12. Chih-Wei Hsu, Chih-Chung Chang and Chih-Jen Lin. A Practical Guide to Sup-port Vector Classification. – 2010. – Режим доступа: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/guide/guide.pdf>, (дата обращения 15.08.2015), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
13. Shewart. W.A. Economic Control of Quality of Manufactured Product. – Van Nordstrom, 1931. – 18 с.
14. Wikipedia, Precision and recall. – Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/Precision\\_and\\_recall](http://en.wikipedia.org/wiki/Precision_and_recall) (дата обращения 15.08.2015), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
15. Wikipedia, Sensitivity and specificity. – Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/Sensitivity\\_and\\_specificity](http://en.wikipedia.org/wiki/Sensitivity_and_specificity) (дата обращения 15.08.2015), свобод-ный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.

# Подбор оптимальных параметров 3D печати по технологии Fused Filament Fabrication с использованием технологий компьютерного зрения

Лихтин Семён Сергеевич

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
lihtin@sfedu.ru

**Аннотация.** Аддитивное производство (AM) – это технология, позволяющая напрямую создавать трехмерную физическую модель, где материалы объединяются в продукт, в отличие от традиционного метода производства, где от материала вычитается все лишнее. Одной из наиболее распространенных технологий аддитивного производства является Fused Filament Fabrication (FFF) – производство методом послойного наплавления нити. В работе рассмотрена возможность подбора оптимальных параметров с помощью технологий компьютерного зрения. Данный подход позволяет снизить временные затраты на производство и уменьшить стоимость готового изделия.

**Abstract.** Additive manufacturing (AM) is a technology that allows you to create a three-dimensional model of production, where materials are combined into a product, as opposed to the average production method, where everything unnecessary is subtracted from the material. One of the most common additive manufacturing technologies is Fused Filament Fabrication (FFF) – production by layer-by-layer fusing of a filament. The paper considers the possibility of selecting optimal parameters using computer vision technologies. This approach allows you to reduce the time spent on production and reduce the cost of the finished product.

**Ключевые слова:** Распознавание образов, компьютерное зрение, подбор оптимальных параметров, 3d печать, обработка изображений.

**Keywords:** Pattern recognition, computer vision, selection of optimal parameters, 3d printing, image processing.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Технология аддитивного производства широко используется в инженерии для изготовления индивидуальных продуктов, функциональных моделей, предоперационных моделей и концептуальных моделей. Эта технология находит свое применение во многих областях машиностроения и промышленности, таких как самолет, реставрация зубов, медицинские имплантаты и автомобильная продукция.

Как показано на рис. 1, в этом процессе материал плавится в жидкое состояние в головке нагревательного блока, а затем выборочно осаждается через сопло, которое отслеживает геометрию поперечного сечения детали для создания трехмерных деталей непосредственно из модели послойно.

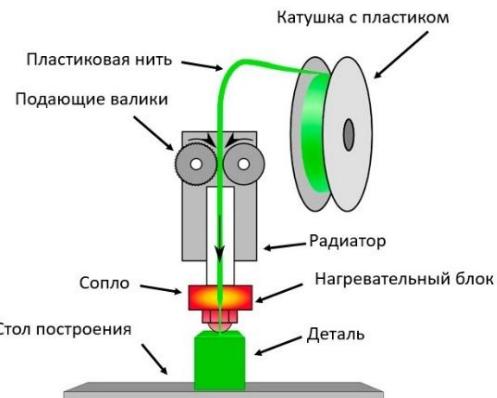


Рис. 1. Схематичное представление FFF технологии

В настоящее время процессы аддитивного производства, включая процесс FFF, необходимы для обеспечения превосходного качества деталей, высокой производительности, безопасности, низкой стоимости производства и короткого времени выполнения заказа. Чтобы удовлетворить потребности и удовлетворение потребностей клиентов, необходимо установить условия процесса аддитивного производства для каждого прикладного применения. Ключевой успех процесса аддитивного производства зависит от правильного выбора параметров процесса. Определение оптимальных технологических режимов – важная задача технологов. Он играет важную роль в обеспечении качества продукции, повышении точности размеров, предотвращении неприемлемых отходов и большого количества обрезков, повышении производительности и сокращении времени и стоимости производства. FFF – это сложный процесс, который вызывает большие трудности при определении оптимальных параметров из-за наличия большого количества конфликтующих параметров, которые влияют на качество детали и свойства материала. Качество детали и механические свойства изготовленной детали можно объяснить правильным подбором технологических параметров процесса FFF.

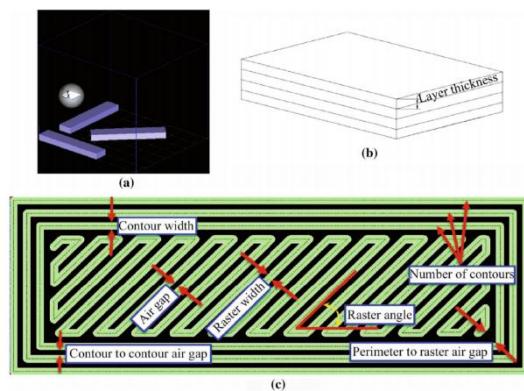


Рис. 2. а – ориентация построения, б – толщина слоя и в – параметры траектории сопла”

## II. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Для понимания актуальной ситуации в сфере 3д печати были изучены публикации, связанные с подбором оптимальных параметров в печати по технологии FFF, а также публикации, в которых рассматривается влияние параметров печати на конечное изделие.

В статье [1] экспериментально исследовали влияние параметров FFF и ориентации построения на прочность на растяжение и прочность на сжатие деталей из ABS, обработанных FFF. В экспериментах варьировались следующие параметры: воздушный зазор, ширина линии, температура модели, цвет материала и ориентация конструкции. Для определения влияния параметров процесса на механические свойства был использован полнофакториальный план исследования. Они пришли к выводу, что при использовании оптимальных параметров процесса прочность на разрыв и прочность на сжатие детали из АБС-пластика находились в пределах 65–72% и 80–90% соответственно.

В другой статье [2] показали, что механические свойства и пористость деталей, изготовленных из АБС-пластика, в основном зависят от условий процесса, таких как воздушный зазор, ширина заполнения, ориентации модели, структуры компоновки и слоев модели. Они использовали дробный факторный анализ, чтобы понять влияние каждой переменной процесса. Они сообщили, что воздушный зазор оказал наибольшее влияние на пористость и механические свойства каркасов. На основе их исследования были использованы модели множественной регрессии для проверки значительного улучшения механических свойств и пористости. В этой работе изучалось влияние некоторых переменных на механические свойства, и определение оптимальных настроек не рассматривалось.

В исследовании [3] разработали математическую модель для оптимизации механических свойств деталей FFF с использованием следующих входных переменных: толщина слоя, ориентация модели, угол заполнения, ширина заполнения и воздушный зазор. Использовались методы ССД и ANOVA. Это исследование привело к выводу, что при увеличении толщины слоя требуется меньшее количество слоев. Это снижает остаточное напряжение и деформацию детали, а также повысило ее прочность за счет повышения сопротивления детали. Был также сделан вывод о том, что малый угол заполнения

не является предпочтительным, поскольку малый угол заполнения может увеличить остаточное напряжение и деформацию, следовательно, ослабить прочность соединения. Было замечено, что толстое заполнение и нулевой воздушный зазор улучшают механические свойства.

Из отечественных исследований следует отметить статью в сборнике научных трудов конференции [4]. В ней провели исследование влияния параметра отката филамента при печати 3д принтера на качество получаемой модели. В итоге автор получил оптимальные параметры печати для той машины, на которой производилась печать. В статьях [5-6] авторы рассматривают основные факторы, влияющие на прочность изделий при печати на 3d-принтере и повышение точности 3d-печати по технологии FFF посредством коррекции кода управляющей программы.

После изучения опубликованной литературы становится ясно, что оптимизация технологических параметров технологии аддитивного производства FFF является одной из наиболее важных задач проектирования с точки зрения показателей оценки качества для получения высококачественных деталей, улучшенного внешнего вида материала и улучшенных прочностных свойств. Поэтому данная тема является актуальной, так как оптимизация параметров печати ведет к уменьшению стоимости изделий, уменьшению временных затрат и повышению качества готового изделия.

Помимо важности темы, было замечено, что мало кто из исследователей, применял технологии компьютерного зрения для получения оптимальных настроек печати. Следовательно, необходимо провести исследование в этой области для решения задачи подбора оптимальных настроек для 3д печати по технологии FFF.

## III. ОПИСАНИЕ МЕТОДА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для работы с технологиями компьютерного зрения существует популярная и многофункциональная библиотека OpenCV.

OpenCV (библиотека компьютерного зрения с открытым исходным кодом) – это библиотека программного обеспечения для компьютерного зрения и машинного обучения с открытым исходным кодом. OpenCV была разработана, чтобы обеспечить общую инфраструктуру для приложений компьютерного зрения и ускорить использование машинного восприятия в коммерческих продуктах. Как продукт с лицензией BSD, OpenCV позволяет компаниям легко использовать и изменять код.

Библиотека OpenCV предоставляет возможность 2D-свертки для того, чтобы производить фильтрацию на изображении. Как и в случае одномерных сигналов, изображения также можно фильтровать с помощью различных фильтров низких частот (ФНЧ), фильтров высоких частот (ФВЧ) и т.д. ФНЧ помогает удалять шумы, размытие изображений и т. д. Фильтры ВЧ помогают находить края на изображении.

OpenCV предоставляет функцию cv.bilateralFilter(), которая очень эффективно удаляет шум, сохраняя при этом четкие края. Но операция медленнее по сравнению с другими фильтрами.

Двусторонняя фильтрация использует фильтр Гаусса в пространстве. Гауссова функция пространства гарантирует, что для размытия рассматриваются только соседние пиксели, в то время как гауссова функция разности интенсивностей гарантирует, что для размытия рассматриваются только те пиксели, интенсивность которых аналогична центральному пикслю. Таким образом, он сохраняет края, поскольку пиксели на краях будут иметь большую вариацию интенсивности.

При обработке изображений также следует учитывать, что программное обеспечение для подготовки управляющей программы для принтера не идеально и будет выдавливать столько нити, чтобы заполнить площадь  $A = b * h$  прямоугольника (ширина экструзии  $b$ , высота слоя  $h$ ). Но так как фактически выдавленная нить пластика представляет из себя не идеальный прямоугольник в сечении, то фактическая ширина будет  $b_T$  (общая  $T$ ), которая состоит из уменьшенной ширины  $b_c$  (с для окружностей) и удвоенного радиуса полуокружностей, что является высотой слоя  $h$ , поэтому  $b_T = b_c + \frac{h}{2}$ .  $b_c$  вычисляется путем изменения вычисления площади, которая включает в себя как уменьшенную площадь прямоугольника ( $b_c * h$ ), так и два полукруга ( $\pi * (h/2)^2$ ) как представлено на рис. 3.

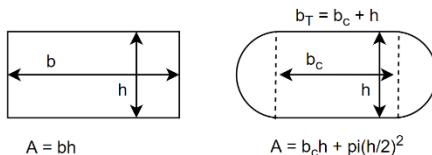


Рис. 3. Отличия формы расчетной площади сечения нити и выдавленной нити

Исходя из этой особенности нужно учитывать, что  $b_T$  всегда будет немного больше, чем думает программное обеспечение слайсера – добавляется примерно 22% высоты слоя.

Таким образом: при ширине экструзии 0,40 мм и высоте слоя 0,20 мм, установленных в программном обеспечении, ожидаемая толщина по периметру одной стены будет приблизительно равна 0,44 мм. Это стоит учитывать при произведении расчетов оптимальных параметров на основе полученных данных от алгоритма обработки изображений.

Следовательно, при подборе оптимальный параметров потока пластика, необходимо принять в расчет соотношение:  $b / b_T$ . Тем самым будет учтено, что линия пластика имеет не ровный прямоугольник в своем сечении и при расчетах можно уменьшить значение на 9%.

#### IV. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Для тестирования предлагаемого решения была создана простая программа, позволяющая выбрать изображение для обработки и производить подбор оптимальной настройки параметра потока пластика. После загрузки изображения и нажатии кнопки «Start» происходит обработка изображения, вычисление необходимых параметров и предоставление результата пользователю как в виде изображения с визуализацией обнаруженного

объекта, так и в виде числовых значений как показано на рис. 4. Вычисленные значения потока пользователь должен внести в настройки программы обработки 3D моделей для печати.

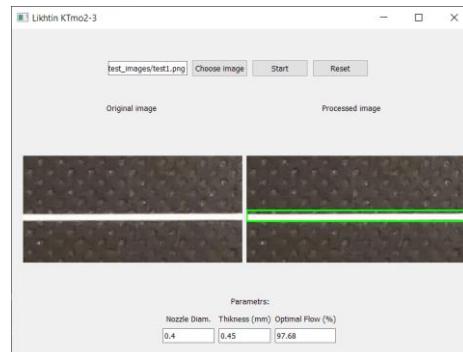


Рис. 4. Результат работы программы

Для проведения экспериментов был выбран 3D принтер Ulti Steel 2, который представлен на рис. 5, от российского производителя.

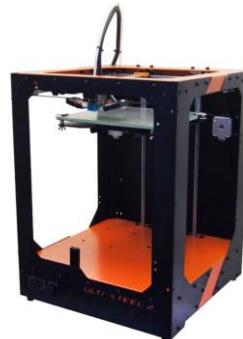


Рис. 5. 3D принтер использованный для экспериментов

После получения значений оптимальных настроек потока, была напечатана серия калибровочных моделей представляющий из себя куб со сторонами 20мм по трем осям. Был оценен внешний вид, качество заполнения периметров модели и отклонение линейных размеров по трем осям.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты тестов с использованием подобранных параметров потока пластика представлены в виде табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

№ теста	Размер по оси X (мм)	Размер по оси Y (мм)	Размер по оси Z (мм)	Наличие щелей в периметрах
1	20.45	20.40	20.34	Нет
2	20.27	20.26	20.29	Нет
3	20.19	20.15	20.15	Нет
4	20.07	20.05	20.04	Незначительные

Проанализировав полученные результаты 3D печати с использованием полученных оптимальных параметров становится видно, что подбор оптимальных настроек по параметру потока может занять в среднем 4 итерации при отклонении размеров модели до 0,04 миллиметра. Предлагаемый метод может быть применен для автоматизации процесса подбора оптимальных параметров 3д печати.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ahn S.-H., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright P.K. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS // Rapid Prototyping Journal. – 2002. – 8 (4). – P. 248-257.
2. Ang K.C., Leong K.F., Chua C.K., Chandrasekaran M. Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures // Rapid Prototyping Journal. – 2006. – 12 (2). – P. 100-105.
3. Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts // Materials and Design. – 2010. – 31 (1). – P. 287-295.
4. Исследования влияния параметра отката филамента при печати 3д принтера на качество получаемой модели. – 2018. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41563841> (дата обращения: 5.05.2022). – Текст: электронный.
5. Основные факторы, влияющие на прочность изделий при печати на 3d-принтере. – 2020. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44285569> (дата обращения 5.05.2022). – Текст : электронный.
6. Повышение точности Зр-печати по технологии FFF посредством коррекции кода управляющей программы. – 2019. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38250009> (дата обращения: 5.05.2022). – Текст : электронный.

# Развертывание БД системы охраны периметра

**Самойлов Алексей Николаевич**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
asamoylov@sedu.ru

**Костюк Андрей Иванович**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
aikostyuk@sedu.ru

**Аннотация.** Целью исследования в данной статье является разработка методов развертывания распределенной базы данных системы охраны периметра с высокими требованиями к масштабируемости и отказоустойчивости. Предметная база данных на основе СУБД Oracle Database Enterprise Edition является хранилищем данных приложения Oracle Retail. В ходе работы были показаны методы развертывания БД системы.

**Abstract.** The purpose of the study in this article is to develop methods for deploying a distributed database of a perimeter security system with high requirements for scalability and fault tolerance. The subject database, based on the Oracle Database Enterprise Edition DBMS, is the data warehouse of the Oracle Retail application. During the work, methods for deploying a database system were shown.

**Ключевые слова:** база данных, высокая доступность, отказоустойчивость, масштабируемость, развертывание, миграция.

**Keywords:** database, high availability, fault tolerance, scalability, deployment, migration.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для целей охраны периметра производственного объекта большой территориальной протяженности с учетом вероятного наличия угроз несанкционированного физического проникновения, на территории которого находятся стационарные или подвижные объекты, требуется, помимо разработки архитектуры такой системы и проработки специализированных алгоритмы интеллектуального анализа и развертывания БД [1–10], проработать вопрос внедрения такой системы на существующие платформы.

При этом целесообразно учесть следующие факторы:

1. Время простоя продуктивной подсистемы должно составлять не более 4 часов.
2. Перед введением каждой системы в эксплуатацию, она должна пройти полный цикл тестирования,ключающий модульное, регрессионное, функциональное и нагрузочное тестирование.
3. Ведение системы в эксплуатацию должно проводиться единовременно, одновременно с подсистемой резервного копирования и отказоустойчивости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-07-00559)

На рис. 1 и 2 представлены разработанная архитектура продуктивной подсистемы и схема архитектуры подсистемы отказоустойчивости.

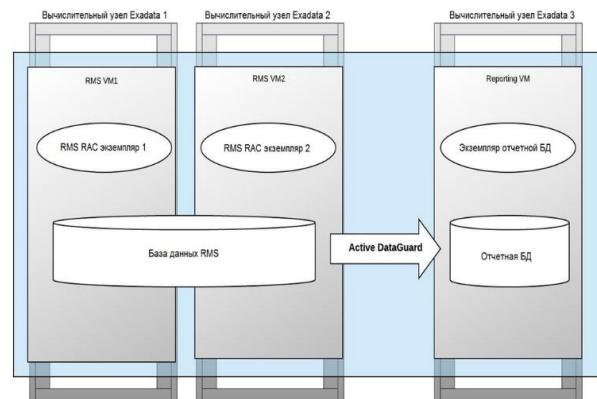


Рис. 1. Разработанная архитектура продуктивной подсистемы

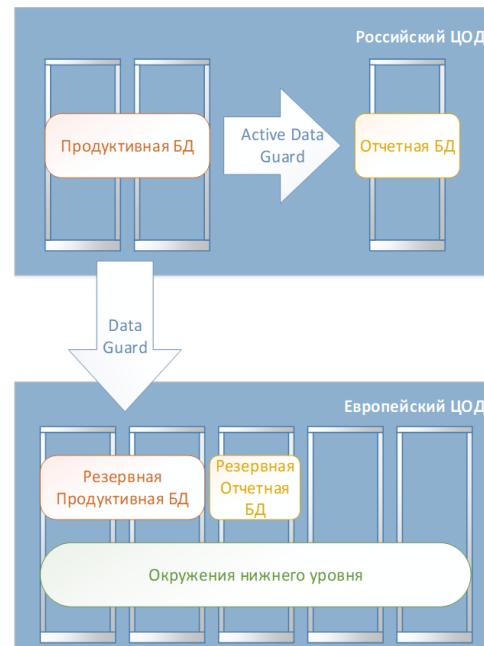


Рис. 2. Схема архитектуры подсистемы отказоустойчивости

Общая архитектура системы показана на рис. 3.

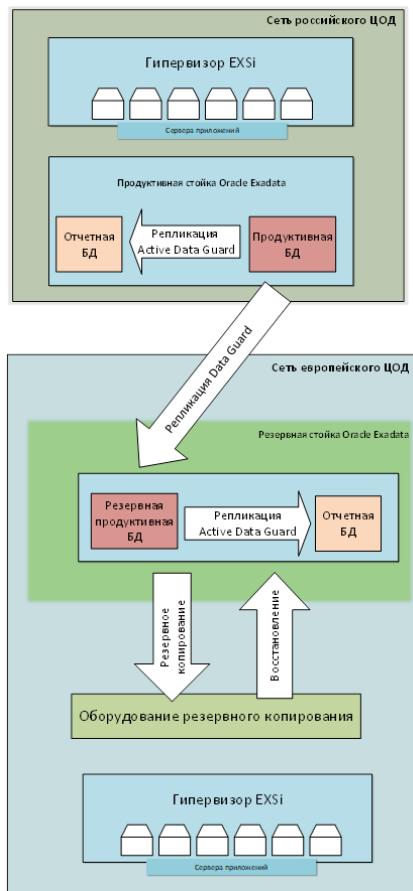


Рис. 3. Общая архитектура системы

## II. СПОСОБ МИГРАЦИИ

В табл. 1 приведен список факторов, влияющих на выбор способа миграции на разработанную архитектуру.

ТАБЛИЦА 1. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЫБОР СПОСОБА МИГРАЦИИ НА РАЗРАБОТАННУЮ АРХИТЕКТУРУ

Фактор	Пояснение
Максимально возможное окно простоя системы	При наличии возможности более долгого простоя системы, список возможных для применения технологий расширяется.
Требования к процессу тестирования	Согласно таким требованиям производится как выбор подхода к тестированию, так и планирование самого внедрения.
Исходная и целевая платформы для миграции	Часть инструментов миграции недоступна при различии исходной и целевой платформы (к примеру, Oracle Data Guard).
Пропускная способность сетевого соединения	При наличии соединения с высокой пропускной способностью многие этапы миграции проходят значительно быстрее (к примеру, инициализация Oracle Data Guard). Таким образом, от этого фактора зависит время, необходимое на применение тех или иных технологий и подходов.

Производительность исходного и целевого оборудования	Аналогично пропускной способности сети, производительность оборудования так же влияет на скорость выполнения работ по внедрению. Кроме того, при отсутствии достаточно мощного оборудования, может возникнуть необходимость сменить подход к миграции, перераспределяя и изменяя ее этапы.
Приемлемое время на подготовку к внедрению	Некоторые технологии и подходы к миграции требуют значительного времени на подготовку к использованию. Так, миграция с помощью Oracle Data Guard требует длительной инициализации пассивной системы, в то время как подход с миграцией с помощью технологии RMAN Duplicate позволяет приступить к миграции практически немедленно.

Следует отметить, что крайне высокая сложность миграции вызвана такими факторами, как:

- Жесткие требования к окну простоя продуктивной системы (не более четырех часов).
- Необходимость кросс-платформенной миграции.
- Необходимость миграции между географически удаленными друг от друга центрами обработки данных.

По этой причине был сформирован двухфазный алгоритм миграции информационной системы:

- Миграция с существующего продуктивного окружения (на базе ОС AIX) на площадку в европейском центре обработки данных (на базе ПАК Exadata) посредством технологии Oracle Cross-platform Transportable Tablespaces (XTTS). Время простоя в данном случае, согласно расчетам, не превысит 4 часа;
- Миграция из европейского центра обработки данных в российский центр обработки данных посредством настройки Oracle Data Guard, с последующим переключением. Время простоя при проведении данной процедуры не превысит 30 минут.

## III. ПОДХОД К НАГРУЗОЧНОМУ ТЕСТИРОВАНИЮ И ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ

Одной из нетривиальных задач при оценке работоспособности СУБД является задача нагрузочного тестирования и отказоустойчивости новой системы.

В большинстве случаев основной проблемой при проведении нагрузочного тестирования является генерация презентативной нагрузки на базу данных. В данном случае под презентативной будем понимать нагрузку, состоящую из схожих запросов к базе данных, исполняемых в схожем объеме.

При наличии лицензии на использование технологий СУБД Oracle, включая пакет Oracle Real Application Testing, для решения этой задачи предлагается использовать технологию Oracle Database Replay, позволяющей производить захват деталей нагрузки с продуктивного

окружения информационной системы, и «проигрывать» захваченную нагрузку на любом другом окружении в целях нагружочного тестирования.

На рис. 4 представлено решение отказоустойчивости исследуемой системы.

Как видно из рисунка, существующая подсистема отказоустойчивости состоит из:

- Сервисов мониторинга и оповещения на базе Nagios – обеспечивающей мониторинг всех критически важных компонентов инфраструктуры, включая приложения, сервисы, операционные системы, сетевые протоколы, системные метрики и сеть инфраструктуру.
- Процессов резервного копирования на базе Oracle Recovery Manager.
- Систем хранения данных, сформированной в дисковый массив RAID 5, который повышает надежность хранения данных, вычисляя функцию четности и увеличивая скорость, чередуя данные на трех и более дисках.
- Выделенного хранилища резервных копий на базе дисковых массивов.

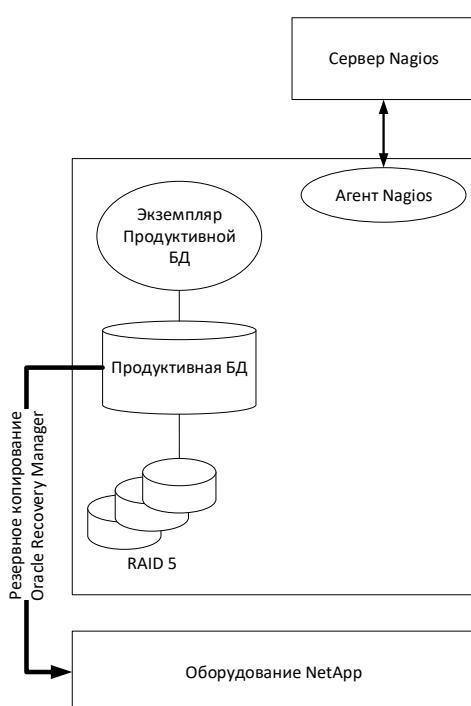


Рис. 4. Решение отказоустойчивости исследуемой системы

Согласно принятым в индустрии практикам, ключевыми показателями эффективности для подсистемы отказоустойчивости информационной системы данного класса являются:

- RPO (Recovery Point Objective) – показатель, определяющий количество данных, которое допустимо потерять, не причиняя значительного вреда предприятию. Это значение также известно, как «терпимость к потерям».

- RTO (Recovery Time Objective) – показатель, представляющий собой количество времени, в течение которого система может быть недоступна, не приводя к значительному ущербу.

Распространенной практикой является построение матрицы, производящей детализацию значений RPO и RTO по отношению к различным вариантам потенциальных ситуаций, влекущих за собой недоступность системы.

#### IV. АЛГОРИТМ МИГРАЦИИ ПРОДУКТИВНОЙ ПОДСИСТЕМЫ

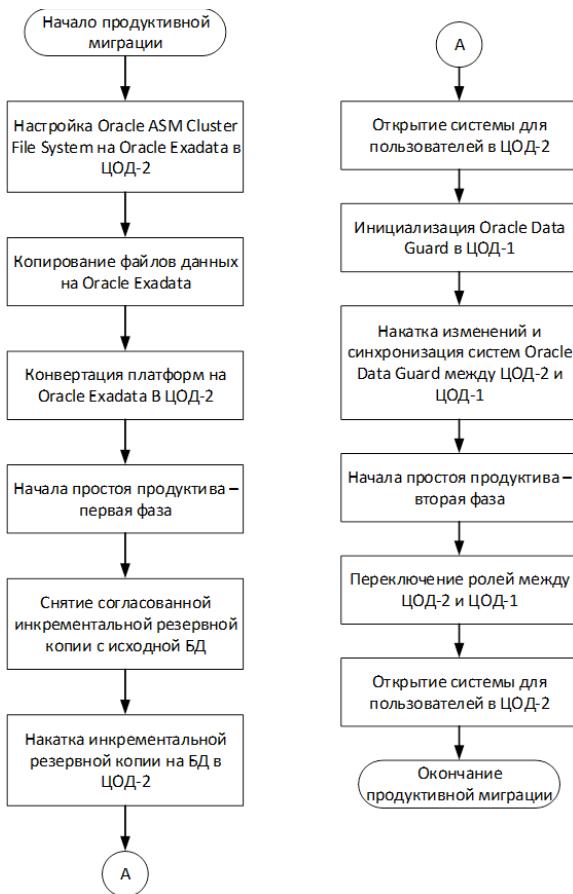
На рис. 5 представлен верхнеуровневый алгоритм полной миграции существующих продуктивного и отчетного окружений заказчика. Для простоты были введены условные обозначения:

- ЦОД-3 – исходный центр обработки данных, из которого производится миграция;
- ЦОД-2 – промежуточный центр обработки данных, который в последующем будет выступать резервной площадкой;
- ЦОД-1 – целевой центр обработки данных, миграция продуктивного окружения в который является целью проекта.

На рис. 6 представлен подробный алгоритм миграции продуктивной информационной системы из ЦОД-3 в ЦОД-1.



Рис. 5. Верхнеуровневый алгоритм полной миграции



*Рис. 6. Алгоритм миграции продуктивной информационной системы из ЦОД-3 в ЦОД-1*

Основные этапы проекта развертывания могут быть сформулированы как:

1. Конфигурация оборудования.
  2. Конфигурация программного обеспечения базы данных.
  3. Первый раунд миграции.
  4. Первый раунд тестирования.
  5. Второй раунд миграции.
  6. Второй раунд тестирования.
  7. Третий раунд миграции (подготовка к вводу в эксплуатацию).
  8. Миграция продуктивной среды. Фаза 1. Миграция на Oracle Exadata в центр обработки данных в Европе.
  9. Миграция продуктивной среды. Фаза 2. Миграция на Oracle Exadata в центр обработки данных в России.
  10. Принятие решения о вводе в эксплуатацию.

Соответствующая диаграмма Ганта показана на рис. 7.

Используемая в процессе миграций система мониторинга и оповещения показана на рис. 8.

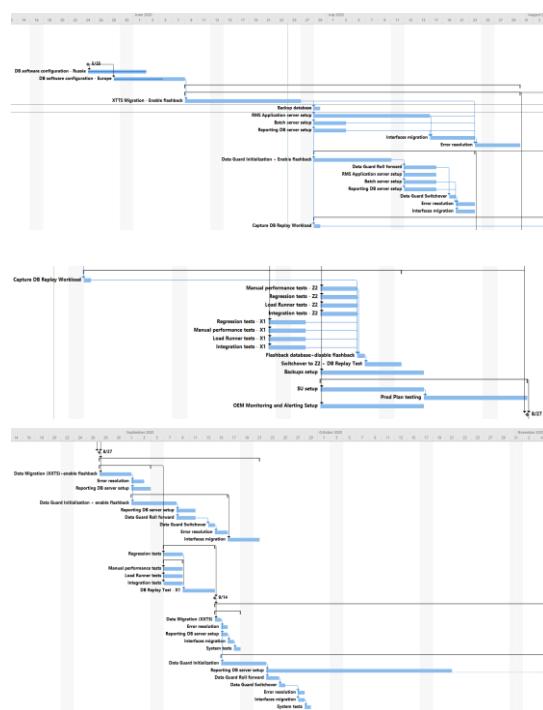


Рис. 7. Диаграмма Ганта

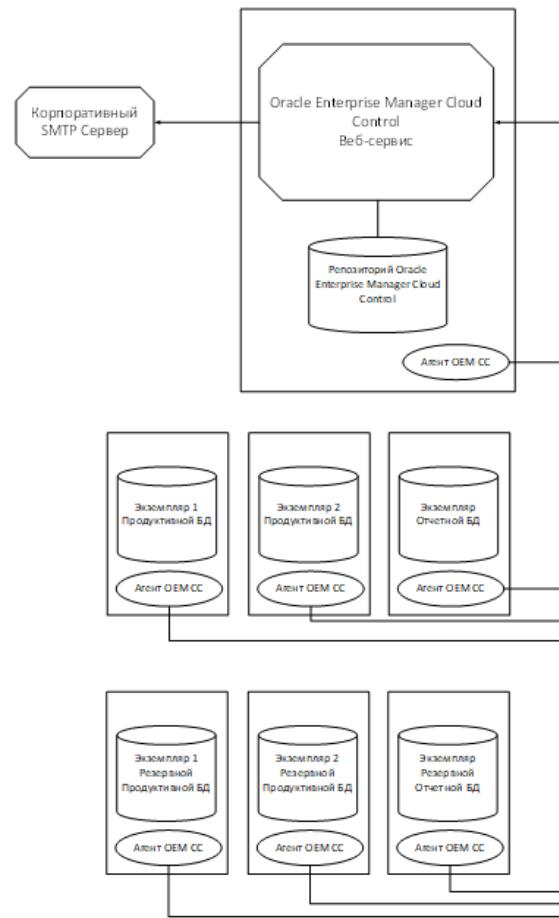


Рис. 8. Архитектура системы мониторинга и оповещения

## V. Выводы по предложенному подходу

Таким образом, был сформирован подход к разработке архитектуры, включающий в себя:

- Исследование структуры и производительности существующей архитектуры и анализ достигаемых ей KPI.
- Планирование и прогноз использования ресурсов системой.
- Выбор платформы для дальнейшего построения архитектуры.
- Разработку архитектуры на базе выбранной платформы.
- Разработку и описание алгоритма миграции.
- Разработку плана проекта по внедрению.

В результате исследования существующей системы были получены данные о ее структуре, составляющих, производительности и эффективности. Кроме того, важным результатом исследования стало получение данных о требованиях к новой, модернизированной системе. Собранные на данном этапе данные были использованы для прогнозирования параметров и требований системы к оборудованию.

На основе результатов исследования платформой для построения новой системы был выбран программно-аппаратный комплекс Oracle Exadata, как предоставляющий наиболее продвинутые технологии для обеспечения масштабируемости, доступности и эффективности системы.

На базе ПАК Oracle Exadata была разработана архитектура системы, удовлетворяющая жестким требованиям к масштабируемости и отказоустойчивости.

Основными особенностями разработанной архитектуры являются:

- Использование технологии Oracle Real Application Clusters для обеспечения отказоустойчивости и масштабируемости.
- Использование технологии Oracle Data Guard для обеспечения отказоустойчивости и возможности переключения между производственной и резервной площадками.
- Задействование двух географически дистанционированных центров обработки данных и настройка постоянной репликации между ними.
- Использование технологий Oracle Exadata для повышения эффективности работы оборудования.
- Организация мониторинга системы, оповещений об аварийных ситуациях на базе Oracle Enterprise Manager Cloud Control.
- Использование технологии каскадной пересылки записей журнала повторов для уменьшения времени простоя при смене ролей окружений.

По результатам разработки была сформирована общая архитектурная схема информационной системы, с применением графического языка разработки корпоративных архитектур ArchiMate.

Для внедрения разработанной архитектуры системы на место существующей был разработан двухфазный алгоритм миграции системы, с использованием таких технологий, как:

- Oracle Cross-platform Transportable Tablespaces (XTTS).
- Миграция посредством Oracle Data Guard Switchover.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Костюк А.И. Структуры данных системы цифрового описания данных средств охраны и мониторинга объектов // Современные научно-исследовательские технологии. – 2017. – № 12. – С. 43-48.
2. Костюк А.И., Шаповал Н.Е. Концептуальная модель базы геоданных объектов: Сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов «Информационные системы и технологии: фундаментальные и прикладные исследования». – Таганрог, 2017. – С. 448-450.
3. Костюк А.И. Изоморфно-статистическая идентификация изображений // Современные научно-исследовательские технологии. – 2017. – № 6. – С. 58-61. – ISSN 1812-7320.
4. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Lebedeva E.M., Kostyuk A.I. Integration of Models of Adaptive Behavior of Ant and Bee Colony. In: Silhavy R. (eds) Artificial Intelligence and Algorithms in Intelligent Systems. CSOC2018 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Vol. 764. – Springer, Cham, 2019. SCOPUS. Online ISBN 978-3-319-91189-2.
5. Костюк А.И., Мунтян Е.Р., Поленов М.Ю. О подходе к модернизации программной системы поддержки управлеченческих решений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 3. – С. 46-54. – ISSN 1999-9429 (Print).
6. Костюк А.И., Поленов М.Ю., Мунтян Е.Р., Лукьянов В.А., Николава А.Ю. Исследование возможности внедрения виртуализации в системах управления Smart House // Информатизация и связь. – 2015. – № 3. – С. 72-77. – ISSN: 2078-8320.
7. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Lebedeva E.O., Kostyuk A.I. VLSI Planning Based on the Ant Colony Method. In: Abraham A., Kovalev S., Tarassov V., Snasel V., Vasileva M., Sukhanov A. (eds) // Proceedings of the Second International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’17). IITI 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Vol. 679. – P. 388-398. – Springer, Cham.
8. Поленов М.Ю., Костюк А.И., Лукьянов В.А. Анализ существующих угроз для безопасности виртуальной среды. Информационные технологии, системный анализ и управление // Сборник трудов XII Всероссийской научной конференции. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – Т. 1. – С. 76-78.
9. Мунтян Е.Р., Костюк А.И., Лиотвейзен В.В. Особенности виртуальной карты для расчета маршрута соединений. Инновационное развитие современной науки: Сборник статей Международной научно-практической конференции (14 марта 2015 г., г. Уфа). В 2 ч. Ч. 1. – Уфа: Азтерна, 2015. – С. 49-52..
10. Костюк А.И., Беспалов Д.А., Волошин А.В. Принципы создания архитектуры распределенной базы данных для задачи охраны периметра // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия «Естественно-математические и технические науки». – Майкоп: Изд-во АГУ, 2020. – Вып. 3 (266). – 104 с. – С. 80-86.

# Анализ, обработка и управление информацией в инфраструктурах пространственных данных

**Ямашкин Станислав Анатольевич**

Институт электроники  
и светотехники  
МГУ им. Н.П. Огарева  
Саранск, Россия  
*yamashkinsa@mail.ru*

**Ямашкин Анатолий Александрович**

Географический факультет  
МГУ им. Н.П. Огарева  
Саранск, Россия  
*yamashkin56@mail.ru*

**Федосин Сергей Алексеевич**

Институт электроники  
и светотехники  
МГУ им. Н.П. Огарева  
Саранск, Россия  
*fedosinsa@mrsu.ru*

**Моисеев Сергей Степанович**

ООО «Санкт-Петербургская  
Цементная компания»  
Санкт-Петербург, Россия  
*sales@nsicem.ru*

**Аннотация.** В статье решается задача систематизации принципов анализа, обработки и управления информацией в инфраструктурах пространственных данных (ИПД) для формирования инструмента принятия взвешенных управлеченческих решений. Показано, что эффективность анализа данных о территориальных системах повышается за счет использования мультимодельного хранилища, консолидируемых из разных источников. Для повышения надежности и отказоустойчивости ИПД целесообразно использовать подход, ориентированный на разработку системы микросервисов.

**Abstract.** The article solves the problem of systematizing the principles of analysis, processing and management of information in spatial data infrastructures (SDI) to form a tool for making informed management decisions. It is shown that the efficiency of the analysis of data on territorial systems is increased by using a multi-model storage consolidated from different sources. To improve the reliability and fault tolerance of SDI, it is advisable to use an approach focused on the development of a microservice system.

**Ключевые слова:** инфраструктуры пространственных данных, метагеосистемы, микросервисная архитектура, пространственные данные.

**Keywords:** spatial data infrastructures, metageosystems, microservice architecture, spatial data.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Цифровизация экономики подразумевает необходимость трансформации технологий сбора и интеграции, обработки и анализа, распространения и эффективного использования пространственных данных. Решение задач обработки и анализа пространственных данных при этом должны во многом опираться на технологии машинного обучения и искусственного интеллекта, внедрение облачных и распределенных вычислений. Консолидированные массивы пространственных данных приобретают практическую ценность при условии возможности их гибкого использования представителями раз-

личных профессий как инструмента принятия обоснованных управленческих решений. Значительное количество видов социально-экономических объектов обуславливает необходимость их четкой систематизации на основе различных критерииев.

В функциональном и генетическом плане их можно классифицировать по группам: население как совокупность индивидов и коллективов, выполняющих преимущественно биосоциальные функции; непроизводственные и производственные предприятия; организации и учреждения общественной инфраструктуры. Различные их сочетания в пределах определенных территорий образуют метагеосистемы. Изучение закономерностей строения, функционирования, динамики и развития метагеосистем ориентировано на выявление систем жизнеобеспечения для принятия управленческих решений различными институтами в области производства и обращения материальных благ, в сфере обслуживания, формирования культурных ландшафтов.

Геопортальные системы как внешний компонент ИПД и точка доступа к пространственным данным представляют собой веб-системы, что накладывает отпечаток на особенности их проектирования, разработки и реализации. Геопорталы обеспечивают информационную поддержку междисциплинарных исследований в области анализа территориально-распределенных систем, обеспечивая систематизированную визуализацию тематических слоев. Важное место при этом занимает разработка инструментов анализа взаимосвязей между слоями цифровой карты геопортала. При первоначальном развертывании геопортала необходимо иметь гарантии устойчивости системы к безопасности и нагрузкам для обеспечения высокого качества работы.

Цель данной статьи – систематизация методологических и инженерных принципов и концепций анализа, обработки и управления информацией в инфраструктурах пространственных данных для формирования инструмента принятия взвешенных управленческих решений.

## II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### A. Этапы исследования метагеосистем

Изучение метагеосистем связано с разработкой методологии и алгоритмов анализа взаимодействия природных, социальных и производственных систем [1], комплексной интерпретации больших пространственных данных, прогнозированием развития пространственно-временных процессов, эффективного распространения пространственно-временных данных посредством внедрения облачных ГИС-технологий и геопортальных систем. Исследование включает в себя несколько этапов:

- программный этап – стратегический документ научного исследования, определяющий цели, задачи, методологию и методы, обосновывающий содержание разделов, календарный план работ, состав исполнителей, стоимость работ и ожидаемый результат, а также методологию и методы исследования на основе знаний о специфике анализируемых метагеосистем и постановке практических задач для решения;
- аналитический этап – анализ и синтез первичной информации, обобщение, систематизация и интерпретация процессов и явлений, установление закономерностей формирования метагеосистем разных иерархических уровней;
- информационный этап – формирование инфраструктуры пространственных данных, картографирование инвариантных и динамических характеристик метагеосистем, выявление территориальных сочетаний, их границ и свойств;
- этап пространственного моделирования – разработка и внедрение цифровых моделей метагеосистем, прогнозирование их развития для принятия управленческих решений;
- концептуально-конструктивный этап – проектирование оптимальных пространственных сочетаний элементов метагеосистем, обоснование проектных решений, разработка рекомендаций по управлению пространственно-распределенными системами.

Высокая сложность метагеосистем [2], выражающаяся в их многокомпонентном строении и многогранности функционального проявления, требует использования современных геоинформационных технологий для их изучения и регулирования.

### B. Базовая структура данных в геопорталах

Основой систем территориального управления любых типов и рангов может стать использование информационной базы, характеризующей состояние территориально-распределенных систем конкретного региона в виде единой ИПД. Структура данных геопортала при этом имеет территориальную, отраслевую и функциональную, составляющие [3]. В территориальном отношении он подразделяется на иерархически соподчиненные кадастры, включающие в себя геоинформационные комплексы административно-функциональных уровней организации общества, начиная от малых урбанизированных и сельских территорий (административные районы, города, поселки и предприятия) и заканчивая феде-

ральными округами (крупными экономическими районами) и странами в целом. В функциональном отношении единый кадастр включает в себя множество разделов отраслевого характера, формируя горизонтальную структуру.

В функциональном и отраслевом отношении структура геопортала определяется принципиальными схемами строения территориальной природно-социально-экономической системы (метагеосистемы). Весь массив информации, может быть разбит на три больших блока по принципу общего структурирования процесса территориального управления. Первый содержит информацию об объекте территориального управления, второй - о его субъекте, а третий - о технологии этой деятельности.

Оценка практической значимости информации, консолидируемой в ИПД, показывает ее неоднозначность. Есть универсальная информация, имеющая базовый характер и во многом определяющая содержание других видов геоинформации. Сказанное относится ко всем выделенным блокам геоинформации, но наиболее ярко это выражено в массиве информации об объекте территориального управления. В этом блоке целесообразно выделить три больших набора видов геоинформации, составляющих 1) адресно-геодезическую основу территории, 2) ее атрибутивную основу и 3) комплекс частной территориальной информации.

Работа по формированию автоматизированных систем управления территориальной информацией начинается с создания адресно-геодезической базы, а затем эта база постоянно поддерживается в обновляемом состоянии. Последнее является необходимым условием достижения эффективности территориального управления метагеосистемами. Вторую группу универсальной геоинформации составляют генеральные карты и планы, сопровождаемые статистическими данными и семантическими характеристиками представленных на них природных, социальных и экономических объектов. Это атрибутивная основа которую можно условно разделить на пять блоков: природа, население, недвижимость, инженерные сети и транспорт.

Информация, собираемая в рамках адресно-геодезической и атрибутивной базы геопорталов, при решении конкретных управленческих задач дополняется частной, узкоспециализированной геоинформацией. Видов этой дополнительной геоинформации существует значительное множество, и поэтому собрать ее всю дорого и практически невозможно, так как информация в большинстве случаев быстро устаревает. В реальном процессе управления дополнительно необходимая информация либо получается специально, либо синтезируется из основной.

Информационный блок «Природа» формируется общими картами геосистем: геологической, инженерно-геологической, гидрогеологической, геоморфологической, гидрологической, климатической, почвенной, геоботанической, зоогеографической. Синтетическая ландшафтная карта выступает центральным звеном, отражающим влияние макроклиматических, тектонических, водно-геохимических, почвенно-биологических и экзогеодинамических факторов на структуру, развитие, динамику, функционирование и устойчивость геосистем.

Информационный блок «Общество» характеризуется схемами и картограммами численности и плотности, половозрастной структуры, естественной динамики, миграции и других демографических характеристик. При анализе процессов хозяйственного освоения ландшафтов используется широкий спектр подходов: археологический, исторический, этнографический, культурологический, демографический.

Информационный блок «Экономика» содержит данные о системе производства, обмена и распределения продукции в обществе; организации производства и разделения труда в различных природных и культурных средах. Объекты недвижимости отображаются на схемах различных видов основных средств: жилых, нежилых, производственных помещений, административных зданий и т.д. Инженерные сети изображаются на схемах электроснабжения, водоснабжения, газоснабжения, теплоснабжения, канализации, связь и др. Логистические системы как сфера обслуживания пассажирских и грузовых перевозок, включающая в себя транспортные сети, транспортные средства и транспортную инфраструктуру (обслуживание), представляется соответствующими картами и картами. Геоинформация собирается на автомобильном, железнодорожном, воздушном, морском, речном и трубопроводном транспорте.

Информационный блок «Экономика» представляет оценку хозяйственного освоения ландшафтов для решения вопросов оптимизации территориальной организации метагеосистем, выявления региональных различий в эффективности функционирования метагеосистемами, определения путей оптимизации использования природных, экономических, социальных и демографических ресурсов.

Все виды геоинформации в цифровом виде изначально представляются в виде отдельных слоев. В дальнейшем при решении задач управления из этих слоев составляются различные комбинации, в результате чего формируется множество производных карт (картографических моделей), позволяющих оценить соотношение факторов и, таким образом, выявить причины явлений и их взаимозависимость. Моделирование территориальных процессов является необходимой предпосылкой для решения задач прогнозирования пространственных процессов с целью решения проектных оптимизационных задач.

#### *C. Распространение пространственных данных на основе геопортальных технологий*

Геопорталы, представляющие собой технологическую основу, реализующую возможность и право граждан, специалистов, руководителей и ученых на получение и распространение пространственной информации, становятся информационной основой устойчивого экологического, социально-экономического развития регионов. Системы этого класса формируют достаточный уровень координации и коммуникации участников различных отраслей для интеграции, обработки и анализа пространственных данных, а также последовательного преодоления барьеров на пути инновационного развития стран и регионов, обеспечивая гибкий доступ к пространственным данным на основе веб-технологий.

Для решения задачи анализа процессов функционирования природных и социальных производственных систем с целью выработки взвешенных управлеченческих

решений в области реализации концепции устойчивого развития территорий целесообразно выделить следующие уровни интеграции пространственных данных:

- Уровень основных пространственных данных, описывающих современную структуру метагеосистем, основанный на формировании базовой картографической основы.
- Уровень пространственных моделей, предполагающий систематизацию данных по таким модулям, как природные (геосистемы и их динамические свойства), социальные (пространственно-временная структура общества и культурные ландшафты), экономические (территориальная организация хозяйственной деятельности регионов), геоэкологические (иерархически организованная среда обитания человека, измененная в условиях техногенеза) системы.
- Уровень принятия управлеченческих решений, обеспечивающий использование пространственных данных для решения задач анализа структуры и свойств земель и прогнозирования природных и природно-техногенных процессов. Синтез цифровых пространственных моделей представляет собой многоэтапный процесс, в ходе которого пространственные данные обрабатываются, анализируются и структурируются.

В рамках внедрения геопортальных систем важно решить следующие конкретные задачи:

- Визуализация пространственных данных в рамках цифровой карты геопортала с целью обеспечения возможности их эффективного распространения и использования.
- Сбор пространственных данных, полученных от внешних провайдеров, включая интеграцию с компонентами IoT.
- Управление пространственно-распределенными объектами посредством отправки управляющих команд через интерфейсы диспетчеризации является функцией, обратной предыдущей.
- Внедрение алгоритмов автоматизации актуально с той точки зрения, что в настоящее время значительное количество пользователей заинтересованы не только в доступе к пространственным данным, но и в развитом функционале их аналитической обработки, прогнозирования и принятия управлеченческих решений.
- Проектно-ориентированное использование интеллектуальных алгоритмов, основанное на использовании методов машинного обучения для анализа гетерогенных пространственных данных, в том числе на основе моделей глубоких нейронных сетей.
- Интерактивное формирование отчетной документации на основе пространственных данных геопортала, содержащей как результаты аналитической обработки сводных данных, так и систему автоматически формируемых рекомендаций относительно возможности достижения конкретных параметров.

- Функционирование подсистемы администрирования, обеспечивающей функционал по манипулированию пространственными данными геопортала с необходимыми правами доступа.

Наконец, графические интерфейсы системного администратора могут содержать компоненты для управления интеграциями с внешними поставщиками пространственных данных и объектов дистанционного управления, задания правил предоставления и визуализации данных, параметризации алгоритмов автоматизации.

Следует различать два направления развития каркаса ИПД. С одной стороны, необходимо придерживаться дедуктивной стратегии, при которой фреймворк изначально разрабатывается для достижения возможности охвата решений максимального количества проектных задач. С другой стороны, необходима эффективная реализация индуктивной стратегии, в рамках которой положительно зарекомендовавшие себя улучшения частных конкретных систем становятся основой для развития системного каркаса. Совместное использование дедуктивной и индуктивной стратегий обеспечит эволюционное совершенствование основы построения геопортальных систем, а также оптимизацию разрабатываемых на ее основе частных решений.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### A. Организация хранилища пространственных данных

Для организации систем интеграции, хранения и обработки больших массивов пространственно-временной информации в ИПД целесообразно использовать комплекс систем управления базами данных. Множество геопространственных баз данных можно разделить на две категории: реляционные базы данных и NoSQL-хранилища. Наиболее широко используются реляционные базы данных: высокоорганизованная структура и гибкость делают хранилища данного класса мощными и адаптируемыми к различным типам пространственных данных [4].

Реляционные СУБД имеют ряд недостатков, не позволяющих в ряде случаев разворачивать крупномасштабные среды доступа к пространственным данным. Новые геопространственные приложения, реализованные в системе ИПД, требуют эластичной масштабируемости, устойчивости к высоким нагрузкам, быстрого отклика на запросы со сложными параметрами агрегации. Традиционные пространственные реляционные СУБД не могут обеспечить эту возможность. Например, потоковая передача запросов от компонентов IoT на сервер может легко привести к недоступности системы и увеличению времени отклика.

Альтернативные преимущества процессу интеграции пространственных данных могут дать NoSQL-хранилища, представляющие собой распределенные СУБД, не требующие жесткого структурирования данных. Они не ограничиваются реализацией стандартных свойств реляционного хранилища ACID (атомарность, согласованность, изоляция и долговечность), что делает их открытыми для горизонтального масштабирования. В то же время NoSQL СУБД демонстрируют способность интегрировать и индексировать большие наборы данных, поддерживая большое количество одновременных и сложных пользовательских запросов. Следует отметить, что

пространственных типов данных и геометрических функций в реляционных СУБД данных явно больше, чем в базах данных NoSQL, в которых пространственные объекты могут описывать точечные, линейные, полигональные объекты и геометрические наборы. Каждая отдельная СУБД, основанная на определенной парадигме интеграции информации, не может дать ключ к решению всех задач в области консолидации пространственной информации. Задачу интеграции, хранения и обработки больших массивов пространственно-временной информации целесообразно решать на основе мультимодельного хранения, гибридной базы данных, основанной на функциональных возможностях СУБД разных классов.

Сравнительный анализ потенциальных функциональных требований к развертываемой ИПД, опыт проектной реализации систем данного класса, исследования современного рынка СУБД позволили сформировать реестр компонентов, на основе которых она Целесообразно организовать мультимодельное хранение пространственной информации (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. СУБД, ФОРМИРУЮЩИЕ МУЛЬТИМОДЕЛЬНОЕ ХРАНИЛИЩЕ

СУБД	Модель данных	Поддержка пространственных данных	Пространственные индексы	Лицензия	Управление транзакциями	Применение в ИПД
MySQL	Реляционная	Базовые пространственные операции индексации, хранения и анализа	R-дерево	GPL	ACID	CRUD-манипуляции с нормализованными базовыми данными о территориальных объектах в рамках геопорталов
PostgreSQL	Реляционная	Ичерпывающая поддержка пространственных данных и операций	R-дерево, GiST, BRIN и SP-GiST	BSD	ACID	CRUD-манипуляции с нормализованными большими данными о метагеосистемах
MongoDB	Документная	Базовые пространственные операции индексации, хранения и анализа	2d sphere index, геохэш	SSPL (на базе GNU AGPL)	Многодокументные ACID-транзакции с изоляцией моментальных снимков	Систематизация слабоструктурированных данных, в том числе о мониторинге пространственных процессов, хранение и регистрация событий
Redis	Резидентная, ключ-значение	Базовые операции с точечными данными	геохэш	BSD	Атомарное выполнение команд, оптимистическая блокировка	Организация высокоскоростного буфера обмена данными ИПД с внешними агентами и системами, системы кеширования
Neo4j	Граф-ориентированная	Базовые пространственные операции индексации, хранения	R-дерево	GPL	ACID	Хранение информации о горизонтальных и вертикальных связях геосистем
ClickHouse	Колоночная	Базовые пространственные операции индексации, хранения	текслогический иерархический пространственный индекс	Apache	Нет (Атомарность и изоляция поддерживаются для отдельных операций)	Организация модулей интерактивной аналитической обработки данных (OLAP-компонентов) в ИПД
Timescale DB	Хранилище временных рядов	Базовые пространственные операции индексации, хранения геовременных данных	R-дерево	MIT	Поддержка обеспечения целостности данных после неатомарных манипуляций	Сбор и управление пространственными данными, меняющимися с течением времени: показателей развития стихийных процессов, транзакций Интернета вещей

В реестр СУБД, составляющих основу организации мультимодельного хранилища данных ИПД, входят системы, относящиеся к классу открытого программного обеспечения и поддерживающие операции с пространственными данными на том или ином уровне. Результаты сравнительного тестирования производительности колоночного хранилища (на базе ClickHouse),

реляционных баз данных (MySQL, PostgreSQL) и систем хранения временных рядов (TimescaleDB) представлены в табл. 2.

Производительность измерялась на одном сервере на базе 2-ядерного процессора Intel Xeon с тактовой частотой 2,60 ГГц, оперативной памяти – 128 ГБ, хранилище организовано на базе жестких дисков. Емкость хранилища измеряется 100 миллионами записей.

ТАБЛИЦА 2. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ БАЗ ДАННЫХ РАЗНЫХ КЛАССОВ В РАМКАХ МУЛЬТИМОДЕЛЕЙ ХРАНИЛИЩА

Тип запроса	Время выполнения, с. ("меньше" - "лучше")			
	ClickHouse	MySQL	PostgreSQL	TimescaleDB
Простая выборка	$2.0 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$5.1 \cdot 10^0$	$3.1 \cdot 10^0$
Выборка с условием	$4.0 \cdot 10^{-2}$	$3.1 \cdot 10^2$	$7.9 \cdot 10^0$	$6.5 \cdot 10^0$
Агрегация с сортировкой по одному полю	$7.3 \cdot 10^{-1}$	$\infty$	$4.5 \cdot 10^1$	$2.5 \cdot 10^1$
Агрегация с сортировкой по нескольким полям	$2.1 \cdot 10^0$	$\infty$	$2.5 \cdot 10^2$	$3.8 \cdot 10^1$

Как видно из таблицы, реляционные СУБД и хранилища временных рядов могут иметь преимущества или, по крайней мере, показывать сравнимую производительность при выполнении простых запросов на выборку данных. Необходимость агрегирования больших данных по множеству полей делает невозможным использование классического реляционного подхода, особенно в условиях высокой нагрузки на систему хранения данных. Столбчатые СУБД решают эту проблему, в то время как реляционные системы остаются актуальными для хранения хорошо структурированных нормализованных данных.

#### B. Организация микросервисной архитектуры для управления пространственными данными

К неотъемлемым проблемам обработки геопространственных данных следует отнести увеличение потребности в одновременном доступе к пространственной информации; большой, растущий объем анализируемых данных; сложность алгоритмов пространственной обработки, ориентированных на высокую точность и автоматизацию. Растущий объем геопространственных данных и сложность алгоритмов их обработки часто сталкиваются с недостатком вычислительных возможностей локальных рабочих станций. Это, в свою очередь приводит с смещением концепции реализации современных геоинформационных систем от настольных решений к облачным, обеспечивающих практически неограниченное пространство для хранения больших объемов данных и запуска ресурсоемких алгоритмов и моделей.

С целью решения задачи эффективного функционирования систем консолидации, обработки и анализа геопространственных данных и выполнения геопространственных автоматизированных процессов в облачной среде может быть применены микросервисные архитектурные решения, предполагающие в том числе использование языков программирования, специфичных для предметной области [4, 5]. Облачная организация инфа-

структур пространственных данных решает проблемы масштабируемости, доступности, отказоустойчивости и подходит для хранения и обработки растущих объемов данных.

Традиционные настольные ГИС имеют функции, внедрение которых представляет интерес и в облачной системе. Важное место среди них занимают возможность автоматизации многократно повторяющихся рабочих процессов, позволяющей значительно сэкономить время и ресурсы. Актуальной проблемой является развитие систем управления рабочими процессами обработки геопространственных данных, позволяющих координировать и распараллеливать существующие алгоритмы.

В рамках использования облачных геоинформационных систем конечные пользователи заинтересованы в реализации следующих функций:

- использование геопортальных интерфейсов, предоставляющих возможность обработки и визуализации больших наборов геопространственных данных;
- работа с инструментарием для создания и управления процессами автоматизации повторяющихся задач без необходимости взаимодействия с деталями организации вычислительной инфраструктуры;
- внедрение масштабируемых компонентов, направленных на обработку и анализ мультиданных пространственных данных с возможностью их комбинирования для создания сложных цепочек на основе процессов обработки.

Микросервисная архитектура предполагает организацию взаимодействия изолированных служб, каждая из которых выполняет свою и только свою конкретную задачу. Архитектура облачного хранилища пространственных данных должна быть основана на использовании интерфейсов и точек расширения, позволяющих непрерывно интегрировать модули анализа пространственных данных без необходимости внесения фундаментальных изменений. Слабое зацепление компонентов системы представляет собой основной аспект формирования микросервисной архитектуры, обеспечивающий легкое расширение системы за счет интеграции новых компонентов и ее эффективное сопровождение.

Представим набор качественных свойств, достигаемых благодаря облачной организации инфраструктуры пространственных данных:

- масштабируемость, предполагающая обеспечение обработки произвольно больших объемов данных из различных источников с целью решения достаточного набора проектно-ориентированных задач.
- модифицируемость, опирающаяся на интеграцию слабо связанных и независимо разворачиваемых микросервисов (модулей) для обеспечения высокой устойчивости инфраструктуры в целом.
- диверсифицируемость процесса разработки, основанная на вовлечении распределенных команд инженеров и ученых с разными, разрабатывающими независимые компоненты, которые можно интегрировать в общую систему для создания единого приложения.

- отказоустойчивость, базирующаяся на создании и внедрении изолированных компонентов, работающих в своем окружении и обменивающихся данными по стандартизованных протоколам.

Достижение обозначенных свойств определяет высокую устойчивость формируемой инфраструктуры к ошибкам различного уровня, появление которых не приводит к остановке работы системы при условии выхода из строя отдельных компонентов. Иным преимуществом при этом становится возможность вовлечения нескольких команд разработчики в процесс постоянного развертывания новых версий своих компонентов без влияния на работу инфраструктуры в целом.

В системе ИПД можно выделить следующие ограничивающие контексты для микросервисов (рис. 1): геопорталы инструменты визуализации и управления пространственными данными), системы анализа и обработки данных и управления ими, а также распределенные облачные хранилища. Разграничение на подсистемы визуализации, обработки и интеграции информации позволяет начиная с верхнего уровня декомпозиции архитектуры системы достичь усиления связности модулей и ослабления зацепления.

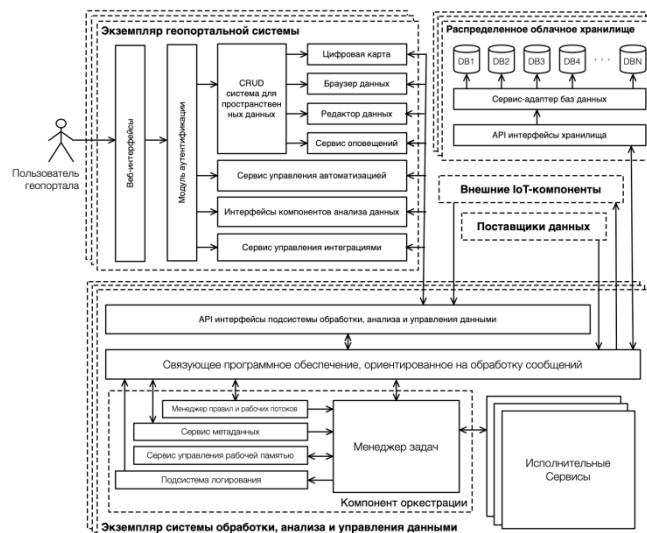


Рис. 1. Организация взаимодействия сервисов в ИПД

Необходимо отметить, что при этом может быть развернуто несколько распределенных экземпляров геопортальных систем, хранилищ данных и систем анализа, причем каждая из них может иметь уникальные функциональные и качественные характеристики.

Геопортальные системы представляют собой точку доступа к информации, консолидированной в цифровых инфраструктурах пространственных данных и проектируются исходя из решаемых задач. Исходя из набора консолидируемых данных и перечня проектных задач, требующих решения, формируются веб-интерфейсы, посредством которых решается задача взаимодействия ключевых акторов системы с инфраструктурой пространственных данных. Так, отдельные геопорталы могут быть нацелены на решение задач интеграции информации об объектах природного, исторического и культурного наследия, управление системами землепользования (например, предприятиями сельского хозяйства),

а также производствами и службами, деятельность которых основана на внедрении и использовании компонентов Интернета Вещей.

На основе модуля аутентификации решается задача управления доступом на основе ролей (Role Based Access Control, RBAC), предполагающая внедрения политик избирательного управления доступом, при этом права доступа акторов системы на использование функционала и данных группируются с учётом специфики их применения, формируя роли в системе.

От цели развертывания геопортала в значительной мере зависят сервисы, разворачиваемые в рамках CRUD системы управления пространственными данными, и решающие задачи создания, чтения, обновления и удаления информации. Центральным сервисом в данном контексте выступает сервис визуализации цифровой карты, позволяющий управлять послойным отображением различных тематических слоев пространственных данных и может быть организован на основе архитектурного паттерна Model-View-Presenter. В рамках отдельного тематического слоя должны быть обеспечены функции интерактивного взаимодействия с пространственными объектами, решаться задачи асинхронной загрузки данных и кластеризации.

Браузер пространственных данных позволяет осуществлять взаимодействие пользователя с системой фильтров, позволяющих осуществлять интерактивный поиск пространственной информации. Несмотря на то, что этот сервис во многих случаях используется совместно с цифровой картой, это – отдельный компонент геопортальной системы, развивающийся независимо.

Сервисы редактирования пространственных данных разрабатываются и развертываются с целью реализации возможности управления хранилищем пространственных данных, позволяют осуществлять единичное и пакетное добавление пространственных объектов, осуществлять импорт и экспорт блоков информации, модифицировать пространственный и атрибутивный контекст.

Наконец, сервисы оповещений обеспечивают оперативное получение важных уведомлений, в том числе визуализируемых в рамках цифровой карты геопортала или браузера пространственных данных.

Сервисы организации интерфейсов взаимодействия с компонентами анализа пространственных данных представляют собой связующее звено, позволяющее осуществлять взаимодействие с исполнительными сервисами подсистемы обработки, анализа и управления пространственными данными, являющимися внешними по отношению к геопортальным системам. С другой стороны сервис управления триггерами автоматизации позволяет решить проблему оптимизации рутинных задач, осуществляя запуск определенных вычислительных расчетов при наступлении определенных условий: временных (наступление определенного времени, истечение периодического промежутка) и событийных (выполнение пространственных или атрибутивно-ориентированных условий). При этом, условия могут быть ориентированы как на анализ текущих параметров, так и на использование статистических характеристик накапливаемой информации.

Сервисы интеграции с внешними компонентами позволяют осуществлять настройку взаимодействия с удаленными системами, в том числе объектами Интернета Вещей. Сервисы интеграции при этом должны быть организованы на основе паттерна Адаптер, позволяющего осуществлять оперативное и унифицированное добавление оборудования новых поставщиков и модификаций.

Распределенные облачные хранилища пространственных данных формируются на основе мультимодельных хранилищ данных, подходы к построению которых представлены ранее. Общая архитектура программно-определенной облачной среды хранения пространственных данных формируется на основе сервисов-адаптеров баз данных, определяющих особенности управления консолидируемой информацией на основе различных политик с целью управления, абстрагирования, объединения и автоматизации взаимодействия с физическими системами хранения на основе технологий виртуализации. Интерфейсы хранилища предоставляют доступ ко всем ресурсам пространственных данных, которыми управляют сервисы-адаптеры, делают среду открытой и расширяемой, благодаря чему возможно осуществлять интеграцию хранилища нескольких поставщиков.

Связующим звеном между геопортальными системами и распределенными облачными хранилищами инфраструктуры пространственных данных выступают системы анализа, обработки и управления пространственными данными, основанные на технологиях автоматизированной обработки информации и анализа данных. Ядро систем этого типа являются исполнительные сервисы, инкапсулирующие в себе программную реализацию алгоритмов обработки и анализа пространственных данных. Для оркестрации процесса выполнения и взаимодействия отдельных сервисов необходимо развертывание менеджера задач, функционирование которого основано на подсистеме определения правил запуска сервисов и выстраивания потока выполнения работ.

Посредством сервиса метаданных решается задача описания унифицированного интерфейса для запуска сервисов обработки, анализа и управления пространственными данными. Благодаря систематизации метаданных о сервисах возможна организация упорядоченного выполнения слабо зацепленных исполнительных исполнительных сервисов.

Для хранения и управления информацией о текущем состоянии выполнения рабочих потоков обработки и анализа данных используются сервисы для управления рабочей памятью. Наконец, модуль логирования представляет собой инструмент сохранения знаний о выполненных процессах.

Связующее программное обеспечение инфраструктуры пространственных данных как комплекс программ для обеспечения взаимодействия между различными сервисами и компонентами целесообразно выстраивать на основе ориентации на обмен сообщениями в распределённом окружении. В отличии от технологий удаленного вызова процедур и использования брокеров объектных запросов, формирующих системы из сильно связанных компонентов, связующее программное обеспечение, ориентированное на обработку сообщений позволяют организовать слабое связывание компонентов.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1) Изучение метагеосистем, отражающих условия жизнеобеспечения населения, может быть использовано при территориальном развитии как крупных территорий страны – субъектов федерации, так и относительно небольших территорий – в региональном планировании. Развитие теории и практики обеспечения условий устойчивого развития природных, социальных и производственных систем возможно в направлении решения научной задачи повышения эффективности анализа закономерностей пространственно-временной организации сложных динамических иерархически организованных геосистем, внутри которых отдельные компоненты природы находятся в системной связи друг с другом и как определенная целостность взаимодействует с космической сферой и человеческим обществом. Методологическое и алгоритмическое обеспечение анализа региональных метагеосистем необходимо апробировать при решении научных и практических задач статического и динамического прогнозирования развития чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и оценки их последствий.

2) В ИПД для оценки процессов функционирования территориальных систем целесообразно выделять следующие уровни интеграции и использования данных: основные пространственно-временные данные; пространственные модели (предполагающие систематизацию данных по модулям природных, социальных, экономических, геоэкологических систем); принятия решений (предусматривая проектно-ориентированное использование данных для организации процессов пространственного прогнозирования). В структурно-функциональном отношении территориальные системы можно дифференцировать на блоки в зависимости от принципиальной структуры процесса взаимоотношений природы, человека и общества: природа, производство, общественная инфраструктура, воспроизводство населения и природных условий.

3) Эффективность анализа данных о территориальных системах повышается за счет использования информационного хранилища, объединяющего разнообразные данные, полученные из разных источников. Ни одна парадигма организации хранения пространственно-временной информации в цифровой системе ИПД не может дать ключ к решению всех задач в связи с необходимостью различных представлений для разных типов пространственно-временных данных. Задачу интеграции, хранения и обработки больших массивов пространственно-временной информации в цифровой ИПД могут решить мультимодельные хранилища, гибридные базы данных на основе функциональных возможностей СУБД разных классов (реляционных, резидентных, документальных, графоориентированных, столбец, хранилища временных рядов). Следствием использования мультимодельных хранилищ является достижение качественных характеристик ИПД – гибкого масштабирования хранилища по мере необходимости, повышения надежности и отказоустойчивости.

4) Для повышения надежности и отказоустойчивости хранилища данных ИПД целесообразно использовать подход, ориентированный на разработку системы мик-

росервисов. Микросервисная архитектура предполагает организацию взаимодействия обособленных сервисов, каждый из которых выполняет свою и только свою конкретную задачу. В системе ИПД можно выделить следующие ограниченные контексты для микросервисов: геопорталы (средства визуализации и управления пространственными данными), системы анализа, обработки и управления пространственными данными, а также распределенные облачные хранилища.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сочава, В.Б. Введение в учение о геосистемах. – Новосибирск: Изд-во "Наука" Сибирское отделение, 1978. – 320 с.
2. Черкашин А.К. Метатеоретическое системное моделирование природных и Социальных процессов и явлений в неоднородной среде // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – № 1 (13). – С. 61-84.
3. Кошкарев А.В., Антипов А.Н., Батуев А.Р. [и др.]. Геопорталы в составе инфраструктур пространственных данных: российские академические ресурсы и геосервисы // География и природные ресурсы. – 2008. – № 1. – С. 21-32.
4. Ямашкин С.А., Ямашкин А.А. Интеграция, хранение и обработка больших массивов пространственно-временной информации в цифровых инфраструктурах пространственных данных // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 5. – С. 108-113.
5. Dragoni N., Giallorenzo S., Lafuente A. [и др.]. Microservices: yesterday, today, and tomorrow // Present and ulterior software engineering. – 2017. – P. 195-216.
6. Артамонов Ю.С., Востокин С.В. Разработка распределенных приложений сбора и анализа данных на базе микросервисной архитектуры // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 4. – С. 688-693.

# К вопросу оценки интенсивности межличностной коммуникации пользователей социальной сети

Полянский Иван Сергеевич  
Академия ФСО России  
Орёл, Россия  
*van341@mail.ru*

Логинов Кирилл Олегович  
УИТО Спецсвязи ФСО России  
Москва, Россия  
*kvirs@mail.ru*

**Аннотация.** В статье рассмотрено решение задачи оценки интенсивности межличностной коммуникации пользователей социальной сети. При формулировке содержательной постановки процедура формирования исходного атрибутивного пространства коммуницирующих пользователей рассмотрена на примере сети ВКонтакте. Основу решения составляют две подзадачи: 1) корреляционная оценка подгрупп коммуницирующих индивидов; 2) непосредственная оценка интенсивности межличностной коммуникации. В отношении первой задачи предложен вычислительно эффективный и устойчивый алгоритм кластеризации, при уточнении однозначного правила выбора числа классов на заданной выборке. При этом, в виду исходной неоднозначности заполнения индивидами публикуемых личных данных и с целью снижения вычислительных затрат, предложено использовать предварительное снижение размерности исходного атрибутивного пространства с применением метода главных компонент. Решение второй задачи выполняется с использованием типовых алгоритмов теории графов – выделение компонент связности, поиска наикратчайших путей и вычисление степени близости вершин.

**Abstract.** In the article, the solution of the problem of assessing the intensity of interpersonal communication of social network users is considered. When formulating a meaningful statement, the procedure for forming the initial attribute space of communicating users on the example of the VKontakte network is considered. The solution is based on two subtasks: 1) correlation assessment of subgroups of communicating individuals; 2) direct assessment of the intensity of interpersonal communication. In relation to the first problem, a computationally efficient and stable clustering algorithm is proposed, while clarifying the unambiguous rule for choosing the number of classes for a given sample. At the same time, in view of the initial ambiguity of filling in the published personal data by individuals and in order to reduce computational costs, it is proposed to use a preliminary reduction in the dimension of the original attribute space using the principal component method. The solution of the second problem is performed using typical algorithms of graph theory – the allocation of connectivity components, the search for the shortest paths and the calculation of the degree of proximity of vertices.

**Ключевые слова:** оценка интенсивности межличностной коммуникации, социальная сеть, граф, кластеризация.

**Keywords:** assessment of the intensity of interpersonal communication, social network, graph, clustering.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Неуклонно растущая популярность социальных медиа в жизни общества, с одной стороны, и относительное структурированное представление данных о пользователях, с другой стороны, определяют значительный интерес ученых к изучению процессов информационного взаимодействия в социальных сетях [1–4]. Учитывая заданное атрибутивное пространство коммуницирующих пользователей социальных сетей, их формализованное исследование выполняется при представлении групп индивидов в виде структурированного социума, а особенности информационного воздействия рассматриваются при построении моделей информационного противоборства, основанных на изучении графовых структур [1, 3, 5], дифференциальных уравнений [6] и стохастических дифференциальных уравнений [4, 7, 8]. При этом неоднозначность и неполнота информации атрибутивного пространства взаимодействующих пользователей при обеспечении компромисса между сложностью и достоверностью реализуемой модели для количественного исследования социальных сетей определяет исходную предпочтительность стохастических решений задачи информационного противоборства в структурированном социуме [4, 7, 8], основанных на типовых методах анализа стохастических динамических систем диффузионно-скаккообразного типа [9].

Формализованное описание стохастических моделей информационного противоборства предполагает задание интенсивностей  $\beta_{mm'} (m, m' \in \overline{1, M})$  межличностной коммуникации пользователей структурированного социума численностью  $N_0$ , который согласно [4] представляется совокупностью взаимодействующих  $M$  подгрупп ( $M \geq 2, 1 \leq N_m < N_0, m = \overline{1, M}, \sum_{m=1}^M N_m = N_0$ , где  $N_m$  – число индивидов в  $m$ -й подгруппе социума). Однако решения [4, 7, 8] не конкретизируют способов определения  $\beta_{mm'}$  в структурированном социуме. В этой связи цель настоящей статьи состоит в уточнении правил определения  $\beta_{mm'}$ , рассмотренных в приложении к решению задача оценки интенсивности межличностной коммуникации пользователей социальной сети ВКонтакте.

## II. СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ МЕЖЛИЧНОСТНОЙ КОММУНИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ

Формирование совокупности взаимодействующих индивидов численностью  $N_0$  может быть выполнено при выделении набора из  $L$  групп сети ВКонтакте (в модели [4] – источники информации). Затем, с учетом известного списка подписчиков и друзей, в отношении выделенных индивидов численностью  $N_0$  составляется неориентированный связный граф [10]:  $G(V, E) \stackrel{\text{def}}{=} \langle V; E \rangle$ ,  $V = \emptyset$ ,  $E \subset V \times V \& \forall e \in E (|e| = 2)$  без петель и параллельных рёбер, в котором множество вершин  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_{N_0}\}$  представляется индивидами социальной сети, а ребра  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_M\}$  устанавливают потенциальное взаимодействие  $V$  при межличностной коммуникации. Путем контент-анализа страниц пользователей при усредненной оценке количества публикуемых фотографий в фотоальбомах, видеозаписей, записей на стене, комментариях в единицу времени в отношении индивида  $v_n$  ( $n = 1, N_0$ ) производится определение потенциальной интенсивности общения  $\rho_n$ . Затем на основе таких опубликованных личных данных о пользователе как: город, образование (свертка таких показателей как: уровень, город, число ступеней образования и пр.), работа (свертка таких показателей как: вид деятельности, число изменений мест работы и пр.), пол, возраст, подписки (свертка таких показателей как: число, типы подписок по категориям) и пр. составляется -мерное атрибутивное пространство индивидов, в котором положение каждого  $v_n$  определяется соответствующим вектором  $\vec{x}^n = (x_1^n, \dots, x_p^n)$ . Для заданной формализации представления пользователей социальной сети задача вычисления  $\beta_{mm'}$  состоит в 1) корреляционной оценки подгрупп общающихся индивидов социальной сети (определение  $M$  при формировании подгрупп  $N_m < N_0$ ); 2) непосредственное определение интенсивности межличностной коммуникации  $\beta_{mm'}$  подгрупп.

## III. ФОРМИРОВАНИЕ ПОДГРУПП КОММУНИЦИРУЮЩИХ ИНДИВИДОВ СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ

С учетом исходной неоднозначности заполнения индивидами публикуемых личных данных, из-за неоднородности координат  $\vec{x}^n = (x_1^n, \dots, x_p^n) \in \mathbb{R}^P$  исходного  $P$ -мерного атрибутивного пространства и с целью снижения вычислительных затрат в последующих решениях [4, 7, 8] предлагается с применением метода главных компонент снизить размерность до пространства  $\mathbb{R}^W$  ( $W < P$ ). Для этого производится вычисление центроида  $\vec{x}^0 = \frac{1}{N_0} \sum_{n=1}^{N_0} \vec{x}^n$  и ковариационной матрицы  $\mathbf{R} = \frac{1}{N_0} \sum_{n=1}^{N_0} (\vec{x}^n - \vec{x}^0)(\vec{x}^n - \vec{x}^0)^T$  для наблюдений  $\vec{x}^n$ . Затем методом QR разложений осуществляется определение вектора собственных чисел  $\vec{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_p)$  матрицы  $\mathbf{R}$  и при их сортировки по убыванию методом степенных итераций определяются собственные векторы  $\vec{\omega}^p = (\vec{\omega}_1^p, \dots, \vec{\omega}_p^p)$ , совпадающие собственному числу  $\lambda_p$  ( $p = 1, P$ ) [11, 12]. С учетом вычисленных  $\lambda_p, \vec{\omega}^p$  для заданного  $W < P$  определяется  $\vec{y}^n$  как проекции исходных  $\vec{x}^n$  на пространство  $\mathbb{R}^W$ :  $y_w^n = \sum_{p=1}^P (x_p^n - x_p^0) \omega_p^w$  [12]. Погрешность  $\delta_W$  проекции оценивается по правилу

$$\delta_W = \frac{1}{P N_0} \sqrt{\sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^{N_0} (x_p^n - \tilde{x}_p^n)^2},$$

где  $\tilde{x}_p^n = \sum_{w=1}^W y_w^n \omega_p^w + x_p^0$ .

Для заданных  $\vec{y}^n \in \mathbb{R}^W$  для определения  $M$  при формировании подгрупп  $N_m < N_0$  выполняется решение задачи кластеризации, основанной на применении модифицированного метода k-средних (k-means), EM-алгоритма и информационном критерии Акаике. Суть кластеризации сводится к реализации следующей последовательности действий.

*Шаг 1.* Положить число классов равное двум:  $M = 2$  и установить их максимально возможное количество  $M_{max} < P$ .

*Шаг 2.* По модифицированному алгоритму k-means++ для заданного  $M$  выбрать начальные центроиды.

*Шаг 3.* Уточнить положение центроидов  $\vec{\mu} = (\vec{\mu}^1, \dots, \vec{\mu}^M)$  и сформировать предварительное разбиение точек  $\vec{y}^n$  на  $M$  классов:  $\vec{Y} = (\vec{Y}^1, \dots, \vec{Y}^M)$ , используя стандартный алгоритм k-means.

*Шаг 4.* Применяя средневыборочные правила [13] по выборкам  $\vec{Y}$  вычислить значения  $\vec{\Sigma} = \{\Sigma_m\}$  ( $m = 1, M$ ), где  $\Sigma_m$  ковариационная матрица подгруппы  $m$ .

*Шаг 5.* EM-алгоритмом выполнить уточнение центроидов  $\vec{\mu}$ , ковариационных матриц  $\vec{\Sigma}$  и классов  $\vec{Y}$ . При этом при прямом проходе для заданных  $\vec{\mu}$  и вычисленных  $\vec{\Sigma}$  выполняется отнесение точек  $\vec{y}^n$  к соответствующим  $m$ -м классам  $\vec{Y}^m \leftarrow \vec{y}^n$  по правилу  $\min_{m \in \{1, M\}} \left[ \frac{1}{2} (\vec{y}^n - \vec{\mu})^T \Sigma_m^{-1} (\vec{y}^n - \vec{\mu}) \right]$ . При обратном проходе итерационным вычислением для обозначения  $N_m = |\vec{Y}^m|$  выполняется уточнение  $\vec{\mu}^m = \sum_{i=1}^{N_m} \vec{Y}_i^m H_i^m / \sum_{i=1}^{N_m} H_i^m$  и  $\Sigma_m$  по средневыборочным правилам [13], где  $H_i^m = H(\vec{Y}_i^m, \vec{\mu}^m, \Sigma_m) = \exp \left[ -\frac{1}{2} (\vec{y}^n - \vec{\mu}^m)^T \Sigma_m^{-1} (\vec{y}^n - \vec{\mu}^m) \right]$ .

Остановка решения EM-алгоритма выполняется при условии незначительного (определяется значение устанавливаемой погрешности) изменении для следующей итерации значения целевой функции правдоподобия, формируемой с использованием формулы Байеса [9], плотности вероятности многомерного нормального распределения [13] и информационного критерия Акаике:

$$F(\vec{Y}, \vec{\mu}, \vec{\Sigma}) = -\frac{1}{N_0} \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_m} \ln \left[ \frac{N_m}{N_0} f_i^m \right], \quad (1)$$

$$\text{где } f_i^m = f_i^m(\vec{Y}_i^m, \vec{\mu}^m, \Sigma_m) = \frac{H_i^m}{\sqrt{(2\pi)^M |\Sigma_m|}}$$

*Шаг 6.* Для сформированных  $\vec{Y}, \vec{\mu}, \vec{\Sigma}$  вычислить итоговое значение функции (1). Увеличить  $M = M + 1$ . Проверить условие  $M < M_{max}$ . В случае выполнения перейти к шагу 2, в противном случае перейти к шагу 7.

*Шаг 7.* По минимальному значению функции (1) для сформированных классов с различными  $M$  выбрать итоговое разбиение  $\vec{Y}$  (рис. 1).

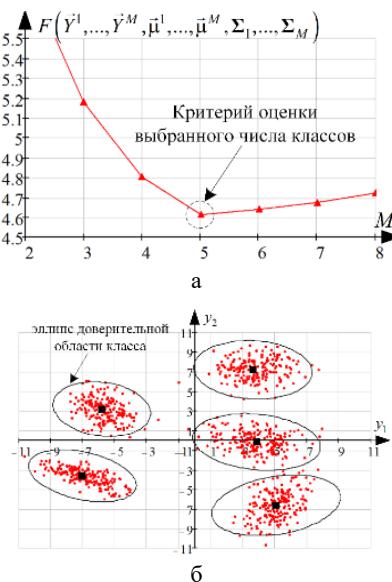


Рис. 1. Пример решения задачи кластеризации для  $W=2$  (б) при представлении зависимости информационного критерия (1) от  $M$

Сформированная структура кластеров  $\bar{Y}$  для заданной графовой модели  $G(V, E)$  индивидов социальной сети (рис. 2) позволяет перейти к непосредственному решению задачи оценка интенсивности межличностной коммуникации подгрупп пользователей.

#### IV. ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ МЕЖЛИЧНОСТНОЙ КОММУНИКАЦИИ ПОДГРУПП ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ

В задаче определения интенсивности межличностной коммуникации подгрупп выделяются две основные особенности оценки  $\beta_{mm'}$ : 1)  $m = m'$ ; 2)  $m \neq m'$ .

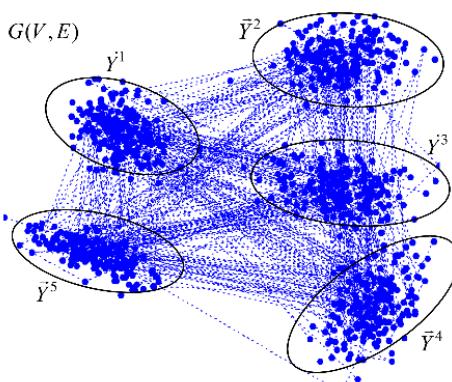


Рис. 2. Пример представления графа  $G(V, E)$  при кластеризации индивидов

В первом случае осуществляется анализ подграфа  $G_m(V^m, E^m)$  графа  $G$ , сформированного из вершин  $V^m \subset V$ , составляющих кластер  $\bar{Y}^m$ , и соответствующих ребер  $E^m \subset E$ , содержащих только вершины  $V^m$ . В отношении  $G_m$  при применении алгоритма Прима [8] для построения минимального остового дерева формируются компоненты связности  $U_s^m \subseteq G_m$  ( $s = \overline{1, S_m}$ ,  $S_m \geq 1$  – число компонент связности  $G_m$ ). Далее для каждой компоненты связности  $U_s^m$  вычисляется средняя интенсив-

ность распространения информации  
 $\theta_s^m = \sum_{i=1}^{|V_s^m|} \rho_i^{ms} C_i^{ms} / |V_s^m|$ , где  $V_s^m$  – множество вершин

$U_s^m; \rho_i^{ms}$  – потенциальная интенсивность общения пользователя, соответствующего вершине  $v_i^{ms} \in V_s^m$ ;  $C_i^{ms} = (|V_s^m| - 1) / \sum_{j=1}^{|V_s^m|} d_{min}(v_i^{ms}, v_j^{ms})$  – степень близости

вершины  $v_i^{ms}$  в  $U_s^m$ ;  $d_{min}(v_i^{ms}, v_j^{ms})$  – минимальное расстояние между вершинами  $v_i^{ms}$  и  $v_j^{ms}$  в  $U_s^m$ , определяемое для всех  $V_s^m$  алгоритмом Флойда–Уоршелла [5]. В итоге оценка  $\beta_{mm} = \sum_{s=1}^{S_m} [\theta_s^m |V_s^m|] / |V^m|$  вычисляется

при усреднении  $\theta_s^m$  в отношении  $G_m$ .

Во втором случае осуществляется анализ подграфов  $G_{mi}(V^{mi}, E^{mi})$ , формируемых при включении в граф  $G_m$  вершины  $v_i^{mi}$  ( $i = \overline{1, |V^{mi}|}$ ) и ребер из  $E$ , содержащих вершины  $V^m$  и  $v_i^{mi}$ . Затем при построении остового дерева для  $G_{mi}$  по алгоритму Прима [8] начиная с вершины  $v_i^{mi}$  выделяется компонента связности  $U^{mi}$  и для нее вычисляется средняя интенсивность распространения ин-

формации  $\theta^{mi} = \sum_{j=1}^{|V^{mi}|} \rho_j^{mi} C_j^{mi} / |V^{mi}|$ , где  $V^{mi}$  – множество вершин  $U^{mi}$ ;  $\rho_j^{mi}$  – потенциальная интенсивность общения пользователя, соответствующего вершине  $v_j^{mi} \in V^{mi}$ ;  $C_j^{mi}$  – степень близости вершины  $v_j^{mi}$  в  $U^{mi}$ . Итоговая оценка

$$\beta_{mm'} = \sum_{i=1}^{|V^{mi}|} [\theta^{mi} |V^{mi}|] / (|V^m| + |V^{mi}|)$$

вычисляется при усреднении  $\theta^{mi}$  в отношении всех  $G_{mi}$ .

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По указанной вычислительной схеме на примере представления пользователей сети ВКонтакте предлагается производить оценку интенсивностей ( $m, m' \in \overline{1, M}$ ) межличностной коммуникации индивидов структурированного социума при уточнении правил его разделения на совокупности взаимодействующих  $M$  подгрупп в последующих решениях [4, 7, 8]. Новизна решения составляет предложенная устойчивая процедура кластеризации данных без учителя, позволяющая нивелировать недостатки типовых методов разбиения на классы при уточнении однозначного правила определения их числа ( $M$ ) на заданной выборке.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бызов Л.Г., Губанов Д.А., Козицки И.В., Чхартишвили А.Г. Идеальный политик для социальной сети: подход к анализу идеологических предпочтений пользователей // Проблемы управления. – 2020. – № 4. – С. 15–26. – DOI: doi.org/10.25728/ru.2020.4.2.
- Caroline Kiarie, Nicola J. Jones. Breaking Social Network Analysis in Organizational and Interpersonal Communication. – 2022. – 30 p. – DOI: 10.4018/978-1-7998-8553-5.ch004.
- Губанов Д.А. Методы анализа информационного влияния в активных сетевых структурах // Автоматика и телемеханика. – 2022. – № 5. – С. 87–101. – DOI: doi.org/10.31857/S0005231022050075

4. Полянский И.С., Логинов К.О., Ильин Н.И., Великих А.С. Математическая модель оценки информационного воздействия на избирателей в социальных медиа при проведении выборных кампаний // Математическое моделирование. – 2021. – Т. 33, № 12. – С. 67-81. – DOI: 10.20948/mm-2021-12-05.
5. Полянский И.С., Беседин И.И., Панин Б.Л. Математическая модель комплекса инженерно-технических средств системы физической защиты объекта охраны // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6 (часть 6). – С. 1359-1365.
6. Михайлов А.П., Петров А.П., Маревцева Н.А., Третьякова И.В. Развитие модели распространения информации в социуме // Математическое моделирование. – 2014. – Т. 26, № 3. – С. 65-74.
7. Ильинский А.С., Полянский И.С., Логинов К.О., Архипов Н.С. К вопросу численной оценки информационного воздействия на избирателей при проведении выборных кампаний // Прикладная Математика и Информатика: Труды факультета ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова. – М.: МАКС Пресс, 2021. – № 68. – С. 15-28.
8. Полянский И.С., Полянская И.В., Логинов К.О. Алгоритмические решения в задаче оценки информационного воздействия на избирателей при проведении выборных кампаний // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2021. – Т. 24. – № 4. – С. 85-99. – DOI: 10.18469/1810-3189.2021.24.4.72-80.
9. Полянский И.С., Архипов Н.С., Мисюрин С.Ю. О решении проблемы оптимального управления адаптивной многолучевой зеркальной антенной // Автоматика и телемеханика. – 2019. – № 1. – С. 93-100. – DOI: 10.1134/S0005231019010069.
10. Полянский И.С., Логинова И.В., Беседин И.И., Фролов М.М. Распределение однородного непрерывного ограниченного ресурса в иерархических системах транспортного типа с древовидной структурой // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 2 (76). – С. 99-106.
11. Архипов Н.С., Полянский И.С. Алгоритм аппроксимации функции многих переменных на основе решения интегрального уравнения Фредгольма второго рода. Ч. 1 // Телекоммуникации. – 2012. – № 1. – С. 2-8.
12. Архипов Н.С., Полянский И.С. Алгоритм аппроксимации функции многих переменных на основе решения интегрального уравнения Фредгольма второго рода. Ч. 2 // Телекоммуникации. – 2012. – № 2. – С. 11-15.
13. Полянский И.С., Патронов Д.Ю. Максимально-правдоподобная оценка дисперсионно-ковариационной матрицы // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 1. – С. 435.

# Модели управления проектными командами

**Федотова Анна Юрьевна**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет

Таганрог, Россия

*ayfedotova@sfedu.ru*

**Самойленко Валерия Сергеевна**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет

Таганрог, Россия

*vsmoylenko@sfedu.ru*

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности нового подхода в образовании. проведен анализ существующих математических моделей. выявлены основные отличия моделей и получаемых результатов. определена проблема существующих моделей формирования команд.

**Abstract.** The article discusses the features of the new institution in education. the analysis of consecutive mathematical models is carried out. the main results of the models are identified and the results are identified. the problem of everyday formation of teams is defined.

**Ключевые слова:** модели, математические модели, команда, проектная команда, формирование.

**Keywords:** *models, mathematical models, team, project team, formation.*

## I. ВВЕДЕНИЕ

В системе высшего образования в России происходит постепенный переход от традиционной модели организации учебного процесса к модели передовых образовательных методик, основная задача которых усилить самостоятельность и творческую активность обучающегося, а также сформировать индивидуальную образовательную траекторию в тесной связи с потребностями реального сектора экономики.

Одним из инструментов персонализации образовательного процесса в высшем учебном заведении является проектная деятельность (проектно и проблемно-ориентированное обучение). Проектная деятельность ориентирована на большой объем самостоятельной работы обучающихся и выстраивание их собственной траектории в образовательном процессе. Методология реализации проектной деятельности в высшем учебном заведении имеет ряд положительных результатов, так, например, у обучающихся формируются универсальные, общепрофессиональные и профессиональные компетенции, активно развиваются soft skills, в том числе коммуникативные навыки, личностные качества, умение решать сложные задачи, нестандартно подходит к процессу решения проблем. С другой стороны, методология проектной деятельности, активно используемая в учебном процессе, по мнению ряда авторов [1; 2], недостаточно формирует навыки, связанные с креативным мышлением и аналитической деятельностью при реализации проектов. Данный факт, отмеченный авторами, связан с определенными недостатками методологии реализации проектной деятельности.

Проектная деятельность является составной частью компетентностной и студентоцентрированной моделей обучения в рамках современной образовательной парадигмы [1; 3]. Именно проектная деятельность позволяет перейти от традиционной формы передачи знаний в паре “преподаватель–студент”, где преподаватель является источником знаний, к форме, где обучающийся проявляет осмысленный, творческий поиск информации, который обеспечит получение знаний и навыков в ходе реализации проекта, и формирует личный образовательный результат, то есть приобретает и развивает собственные компетенции. В такой модели преподаватель становится тьютором, который активно осуществляет построение образовательного процесса: от обозначения проблемы, целей и задач до управления активностью студента в ходе реализации проекта, учитывая его возможности и компетенции.

Для достижения целей в рамках выполнения проекта, необходимо сформировать команду, которая отличается от группы или коллектива непротиворечивостью интересов, а также имеет общие цели, коллективную и взаимную ответственность за результат совместной деятельности, взаимодополняет друг друга. Формирование эффективной команды, участники которой обладают необходимыми профессиональными знаниями, техническими навыками, личностными качествами – проблема, занимающая первое место среди опрошенных руководителей высшего уровня в крупных организациях [4].

## II. АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Для формирования команд используются математические модели, основывающиеся на ключевых свойствах команды.

Так, в работе зарубежного автора Ричарда Гакмана [5] отмечено, что команда обладает пятью ключевыми характеристиками:

- a) команда существует для достижения совместных целей;*
- b) члены команды взаимозависимы в рамках общей цели;*
- c) команды ограничены и устойчивы во времени;*
- d) члены команды имеют полномочия управлять своей работой и внутренними процессами;*
- e) команды функционируют в контексте более общей системы.*

Новиков Д.А. в своей работе “Математические модели функционирования и формирования команд” [6] выделяет семь ключевых характеристик команды, которые отличают ее от группы или коллектива:

- f) единство цели;
- g) совместная деятельность;
- h) непротиворечивость интересов;
- i) автономность деятельности;
- j) коллективная и взаимная ответственность за результаты совместной деятельности;
- k) специализация и взаимодополняемость ролей (включая оптимальное распределение функций и объемов работ, а также синергетичность взаимодействия членов команды);
- l) устойчивость

По мнению авторов работы “Production, information costs and economic organization”, Alchian A. и Demsetz H, важной характеристикой, которую необходимо учитывать при формировании команды, является синергетичность, т.е., когда совместные действия приводят к большему результату [6].

В современных исследованиях в области формирования и функционирования команд применяются различные математические модели, которые делятся на несколько классов по используемому математическому аппарату и числу входящих свойств команды в основу модели:

1. «задачи о назначении»;
2. теоретико-игровые модели;
3. «экспериментальные» исследования;
4. «рефлексивные модели».

Класс “задачи о назначении” направлен на решение следующих задач:

5. формирования состава команд,
6. распределения ролей (ресурсов),
7. распределения объемов работ.

Такие типы задач взаимосвязаны, так как для формирования команды необходимо знать, какие функции будут выполняться, а для распределения функций необходимо знать объем работ, который можно закрепить за исполнителем в рамках той функции, которую он выполняет (рис. 1).



Рис. 1. Взаимосвязь задач

“Задачи о назначении” учитывают пять из семи представленных выше характеристик команды, но не учитывает непротиворечивость интересов ее членов и автономность.

Следующий класс – теоретико-игровые модели, на примере модели Маршака-Раднера. В работе [7] Маршак Д. понимает команду, как группу людей с не противоположными интересами. Автор предлагает рассматривать команду, как множество агентов, в которой каждый агент принимает решение. Общий выигрыш команды зависит от вектора решений всех членов команды и состояния окружающей среды.

В такой модели целевые функции всех агентов – одинаковы. В этом заключается первое свойство команды, которое отражено в модели – единство целей. Остальные свойства команды не находят отражения в модели Маршака-Раднера. В современных исследованиях в области формирования и функционирования команд применяются различные математические модели, которые делятся на несколько классов по используемому математическому аппарату и числу входящих свойств команды в основу модели

Модели репутации, [8] которые относятся к классу теоретико-игровых моделей, среди которых модель норм поведения и модель общих характеристик, которые учитывают такие свойства команды, как единство целей, автономность и устойчивость, а также совместная деятельность.

К “экспериментальным” исследованиям команд относятся деловые игры и имитационные эксперименты. Основная цель данного класса – проверка гипотез о процессах формирования команд.

Наиболее интересный и отражающий сложные свойства класс “рефлексивных” моделей. Такие модели учитывают автономность и согласованность взаимодействия членов команды, которые принимают решения, основываясь на информации о существенных внешних факторах и параметрах команды. К таким моделям можно отнести модель формирования однородной команды. В основе данной модели – иерархия взаимных представлений агентов о типах друг друга, то есть о тех существенных параметрах, которые определяют эффективность деятельности (чем выше эффективность агента, тем меньше затраты). При этом все ожидания членов команды относительно друг друга оправдываются, от этого зависит стабильность и слаженность работы команды. Даже если представления членов команды друг о друге ложные, потребуется дополнительная информация друг о друге, и тогда модели будут отражать такие свойства, как автономность, согласованность и устойчивость взаимодействия членов команды.

На основе анализа математических моделей, можно сделать вывод о том, что эти модели не учитывают компетенции участников для формирования эффективной команды. Для решения этой проблемы необходимо разработать математическую модель, учитывающую не только ключевые свойства команды, но и навыки, знания и умения каждого участника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проектное обучение. Практики внедрения в университетах / под ред. Л.А. Евстратовой, Н.В. Исаевой, О.В. Лешукова. – М.: Открытый университет Сколково, 2018. – 149 с.
2. Шкунова А.А., Плещанов К.А. Организация проектной деятельности студентов в вузе: результаты научного исследования и перспективы развития // Вестник Мининского университета. – 2017. – № 4.
3. Данейкин Ю.В., Калгинская О.Е., Федотова Н.Г. Проектный подход к внедрению индивидуальной образовательной траектории в современном вузе // Высшее образование в России. – 2020. – Т. 29. № 8-9. – С. 104-116.
4. Кочеткова А.И. Психологические основы современного управления персоналом. – М.: Зерцало, 1999. – 373 с .
5. Hackman J.R. Introduction: work teams in organizations: an oriented framework. – MA: Addison Wesley, 1990.
6. Alchian A., Demsetz H. Production, information costs and economic organization // American Economic Review. – 1972. – Vol. 62, No. 5. – P. 777-795.
7. Marshak J. Elements for the theory of teams // Management Science. – 1955. – No. 1. – P. 127-137.
8. Новиков Д.А. Математические модели формирования и функционирования команд. – М.: Изд-во физико-математической литературы. 2008. – 184 с.

# Методика оценки эффективности передачи многомодальной информации

Рындин Артём Валерьевич  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*artem\_ryndin@mail.ru*

**Аннотация.** В работе предложена методика оценки эффективности передачи многомодальной информации, в рамках которой рассматриваются показатели точности, своевременности и производительности. Для анализа данных показателей был проведен анализ требований различных модальностей к параметрам качества обслуживания QoS, произведено сравнение с классами QoS. Кроме того, были рассмотрены подходы к расчету показателей QoS.

**Abstract.** The paper proposes a methodology for evaluating the efficiency of multimodal information transmission, which considers indicators of accuracy, timeliness, and performance. To analyze these indicators, an analysis of the requirements of various modalities for the parameters was carried out, and a comparison was made with the QoS classes. In addition, approaches to the calculation of QoS indicators were considered.

**Ключевые слова:** эффективность, своевременность, точность, производительность, параметры качества передачи данных, многомодальная информация

**Keywords:** efficiency, timeliness, accuracy, capacity, quality of service, multimodal information.

## I. ВВЕДЕНИЕ

С повсеместным распространением беспроводных пользовательских устройств стала актуальна беспроводная передача данных различных приложений пользователей. Согласно Cisco Annual Internet Report (2018-2023) [1] свыше 70% жителей планеты будут иметь доступ к мобильной беспроводной связи к 2023 году. В настоящий момент огромное количество приложений мобильных устройств передают данные пользователя, начиная от игровых приложений, заканчивая приложениями по предоставлению банковских и государственных услуг.

Несмотря на то, что по прогнозам пропускная способность беспроводных сетей значительно вырастет в ближайшие годы [1], также вырастет и объем передаваемого трафика. Это обусловлено, с одной стороны, ростом технологий Интернета вещей (Internet of Things, IoT), с другой стороны, существенно увеличивается роль телекоммуникаций в профессиональной деятельности, обучении и обеспечении общественных отношений. Таким образом, в структуре информационных потоков увеличивается доля услуг, потребляющих значительные объемы ресурса передачи данных [2].

Тенденция передачи данных по беспроводным каналам связи актуальна и для многомодальных информационных систем. В этом случае данные пользователя передаются по открытому каналу публичных сетей с одной стороны, что несет угрозу перехвата многомодальной информации, с другой стороны, что вносит дополнительную нагрузку на сеть.

Под модальностью понимается физически регистрируемый элемент коммуникации (человеко-машинной и/или межличностной), включающий как собственно передаваемую информацию (сообщение), так и информацию о самом индивиде (его состоянии; отношении к сообщению, к собеседнику, к коммуникации и пр.) [3].

Набор многомодальных данных и их размер может быть различным в зависимости от задачи. Так, например, для речевой модальности в системе распознавания речи по аудиозаписи может быть достаточно 70-80 кбайт [4], тогда как для жестовой модальности в системе распознавания русского жестового языка объем одной записи модальности может составлять примерно 125 Мбайт [5].

Кроме того, следует учитывать тот факт, что беспроводное пользовательское устройство не имеет постоянного подключения к какой-либо точке доступа (базовой станции), которая бы гарантировала необходимый уровень качества, поскольку обладает большой пространственной динамичностью. В таком случае пользователь может перемещаться в зоны с критически слабым сигналом сети или вовсе без него или в зоны с большим количеством пользователей, разделяющими пропускную способность канала.

При построении системы передачи многомодальной информации возникает вопрос оценки ее эффективности. В данной работе представлена методика оценки эффективности системы передачи многомодальной информации.

## II. СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ МНОГОМОДАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В тематике исследований крайне мало работ, посвященных вопросам передачи многомодальной информации [6]. В данном контексте в общем виде архитектуру системы многомодального взаимодействия можно представить как клиент-серверную. Многомодальное устройство снимает необходимые характеристики пер-

вого пользователя, формирует протокольные блоки данных (ПБД) модальностей и отправляет их второму пользователю (или системе) [7].

Решения для передачи многомодальных данных должны быть совместимы с существующей сетевой инфраструктурой, обеспечивать гибкое и универсальное взаимодействие пользователей на различных концах соединения.

По аналогии с [8] в общем виде систему многомодального взаимодействия можно представить в виде двух автономных подсистем: совокупности устройств съема и обработки многомодальных данных и сети передачи данных. Общее понятие «сеть передачи данных» используется для составных физических или логических каналов связи и формирующих их узлов коммутации транспортной сети и сетей доступа [9].

В [9, 10] была рассмотрена послойная структура инфокоммуникационной системы для возможной передачи многомодальной информации. Однако основной акцент в данных работах делается на протоколы передачи данных ниже сетевого уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем (OSI model) и инвариантность оптических транспортных сетей к технологии передачи.

### III. АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ МНОГОМОДАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Для любой информационно-коммуникационной системы, какими являются многомодальные системы, встает вопрос оценки ее эффективности.

Согласно [11] под эффективностью информационной системы понимается степень достижения ее целей, поставленных при ее создании.

Для принятия решения о степени достижения требуемой цели необходим критерий эффективности – правило, позволяющее сопоставлять стратегии, характеризующиеся различной степенью достижения цели и осуществлять их выбор из множества допустимых [12].

Критерий эффективности системы определяют на множестве показателей. При этом показатель – это характеристика, описываемая количественно и позволяющая оценить свойство этой системы с какой-либо одной стороны [13].

Одной из важнейших задач при оценке эффективности информационных систем является выбор и обоснование номенклатуры критерии эффективности, которые характеризуют систему.

При выборе критериев эффективности следует понимать, что нет универсальных критериев, которые позволили бы отобразить специфику систем вообще. Поэтому необходимо сформировать критерии, которые характеризовали бы сущность информационных процессов в конкретной системе.

На различных этапах построение информационной системы оценка эффективности преследует различные цели [14]. Так, например, на этапе разработки системы оценка эффективности производится с целью проверки качества предлагаемых к реализации системотехнических решений, а также выбора наиболее целесообразно-

го варианта построения системы для достижения характеристик, определенных требованиями технического задания. На этапе эксплуатации системы оценка эффективности проводится для оценки качества ее функционирования, анализа характеристик в различных условиях и выработки соответствующих рекомендаций по обеспечению требуемых условий функционирования, в том числе и для обоснования необходимости модернизации системы.

Качество информационно-коммуникационной системы – совокупность свойств системы, обуславливающих возможность ее использования для удовлетворения определенных в соответствии с ее назначением потребностей [14].

Согласно [15] выделяют 10 характеристик качества функционирования информационной системы (надежность, своевременность, полнота, актуальность, безошибочность, конфиденциальность и т.д.) и 16 основных показателей качества функционирования информационной системы, для которых задаются конкретные значения.

В [16] были определены частные свойства информационных, телекоммуникационных и информационно-коммуникационных систем на основе стандартов ГОСТ РВ 51987–2002, МСЭ-Т Е.800, Е.430, I.350 [15, 17-19] и на их основе были выделены частные свойства полимодальных информационно-коммуникационных систем: целостность, своевременность, удобство пользования, безопасность, производительность и надежность.

В контексте многомодальных систем следует учитывать свойства, отображающие функционал передачи многомодальных данных. К таким свойствам относятся: точность, своевременность и производительность.

*Точность* – свойство многомодальной системы обеспечивать получение согласованных результатов обработки и передачи многомодальных сообщений. В рамках систем передачи данных свойство точности можно формализовать в следующем виде:

$$A = \frac{N_{\text{точн. бд}}}{t} = \frac{N_{\text{точн. обраб. бд}}}{t} + \frac{N_{\text{точн. дост. бд}}}{t},$$

где  $N_{\text{точн. бд}}$  – совокупность общего количества точно обработанных  $N_{\text{точн. обраб. бд}}$  и доставленных  $N_{\text{точн. дост. бд}}$  ПБД. При рассмотрении данного показателя играет роль количества искаженных, но доставленных данных. При этом показатель точно обработанных  $A_{\text{точн. обраб. бд}}$  подразумевает обработку модальностей на многомодальном интерфейсе.

*Соевременность* – свойство системы передачи обеспечивать доставку информации в сроки, гарантирующие выполнение соответствующей функции согласно целевому назначению системы.

$$E = \frac{N_{\text{дост.бд}}}{N_{\text{перед.бд}}},$$

где  $N_{\text{дост.бд}}$  – количество всех доставленных блоков данных,  $N_{\text{перед.бд}}$  – общее количество переданных сообщений.

*Производительность (C) –* свойство системы обеспечивать обслуживание с требуемым качеством требуемого объема данных на заданном интервале времени. В простейшем случае это характеристика удовлетворения требований класса QoS.

Столиц отмечать, что рассмотренные критерии тесно связаны с классической теорией телетрафика [2] и параметрами качества обслуживания (Quality of Service, QoS). Кроме того, особый интерес представляет оценка качества восприятия (QoE), потому как она не стандартизована и параметры могут быть различными в зависимости от набора модальностей [20]. Именно данная оценка позволяет оценить удовлетворенность пользователя многомодальной услугой. Существует несколько подходов к оценке качества восприятия различной информации. Как правило, она актуальная для мультимедийных систем.

Для характеристики качества передачи данных в гетерогенной беспроводной среде используют оценку показателей качества обслуживания (Quality of Service, QoS) [21, 22]. Данная оценка носит интегральный характер и может затрагивать различные аспекты доставки IP-пакетов. Для каждой задачи можно выделить наиболее существенные, отражающие качество обслуживания. QoS относится к набору показателей качества, используемых для настройки и количественной оценки производительности приложений, систем и сетей.

Наиболее значимые показатели QoS в общем случае для IP-сетей определены в рекомендациях МСЭ Y.1540 и МСЭ Y.1541. Согласно МСЭ Y.1541 сервисы передачи информации в IP-сетях можно поделить на категории, исходя из значений основных характеристик передачи IP-пакетов. Требования к QoS вытекают из характера предоставляемых услуг. Выделяют следующие классы QoS (таблица 1):

Классы 0 и класс 1 определены для потоков данных реального времени, которые крайне чувствительны к вариации задержки;

Классы 2 и 3 определены для передачи данных, для которых характерна высокая степень интерактивности;

Класс 4 определен для данных, чувствительных к потере (передача массивов данных, потоковое видео);

Класс 5 – приложения IP-сетей с характеристиками передачи по умолчанию.

ТАБЛИЦА 1. КЛАССЫ QoS И ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДОСТАВКИ ПАКЕТОВ СОГЛАСНО МСЭ Y.1541

Характеристики доставки IP-пакета	Классы качества передачи информационных потоков					
	0	1	2	3	4	5
Задержка доставки IP-пакета, IPTD	100 мс	400 мс	100 мс	400 мс	1 с	Не опр.
Вариация задержки доставки IP-пакета, IPDV	50 мс	50 мс	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
Доля потерянных пакетов, IPLR	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	Не опр.
Доля IP-пакетов, переданных с ошибкой, IPER	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	Не опр.

В [23] были рассмотрены все пять характеристик QoS для различных модальностей (табл. 2): тактильной, визуальной, речевой, ольфакторной и 3D.

ТАБЛИЦА 2. ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ QoS ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ РАЗЛИЧНЫХ МОДАЛЬНОСТЕЙ

QoS метрика	Человеко-машинные тактильные ощущения	Видео	Аудио	3D	Обоняние	Машинно-человеческая тактильная обратная связь
Тип пакета	(Позиция Скорость, Сила, Кругящий момент)	H.264/MPEG-4	Двойной Стакан	Сетка, Текстура	Запах	Кинестетические сигналы
Размер пакета (B)	1 DoF: 2-8	1.5K	>50	1.5	1	1 DoF: 2-8
	3 DoFs: 6-24					3 DoFs: 6-24
	6 DoFs: 12-48					6 DoFs: 12-48
Вариация задержки (мс)	1-2	30	30	30	$\leq 23$	2
Задержка (мс)	1-50	$\leq 400$	$\leq 150$	100-300	0-1500	10
Пропускная способность (кбит/с)	$\geq 512$	$\geq 2500$	$\geq 128$	$\geq 1200$	0.008	$\geq 512$
Уровень потери данных (%)	0.01-10	1	1	1-10	1	10
Частота обновления (Гц)	$\geq 1000$	30	20	30	0.1-10	$\geq 500$

Тактильная модальность здесь была рассмотрена в рамках системы взаимодействия оператора и удаленного актуатора. Нестабильная работа таких систем является результатом нежелательной задержки, вариации задержки и потери пакетов. Тактильные данные более чувствительны к задержке, поскольку рабочие характеристики кинестетической или тактильной обратной связи обычно находятся в диапазоне от 1 до 50 мс. Для систем межмашинного взаимодействия (M2M), требования к задержке чрезвычайно важны в диапазоне 1–10 мс для взаимодействия с быстро движущимися объектами [24, 25]. Нестабильная задержка (джиттер) наиболее неблагоприятно влияет на процесс телеопераций с точки зрения стабильности работы. Чтобы обеспечить стабильность и прозрачность для таких систем, вариация задержки должна быть менее 2 мс, а потеря данных должна составлять от 0,01% до 10% [25, 26].

Для достижения высокой точности вывода частота обновления должна быть больше 1 кГц. Это означает, что устройство передачи тактильных ощущений должно получать 1000 кадров в секунду [27]. Полоса пропускания – еще одно требование для телеоперативной связи; однако она оказывает меньшее влияние, поскольку кинестетические, тактильные и исполнительные механизмы имеют небольшой объем данных на кадр (обычно 512 кбит/с) [28]. Модель поступления тактильной модальности неоднородна по своей природе и может быть описана с помощью модели Гилберта-Эллиота с марковским процессом с двумя состояниями [29]. Таким

образом, тактильные системы очень критичны с точки зрения задержки, вариации задержки и скорости обновления и очень устойчивы к потере данных и пропускной способности.

Видео представляет собой последовательность кадров визуальных данных, синхронизированных по времени. Частота обновления видео может меняться в зависимости от приложения, однако как правило, составляет 30 кадров в секунду. Для видео требования к QoS должны поддерживаться в рамках установленных временных параметров, чтобы поддерживать временную связь между различными кадрами [26, 30]. Для обеспечения приемлемого качества воспроизведения видео задержка не должна превышать 400 мс. Вариация задержки должна быть не выше 30 мс. Кроме того, видео в реальном времени требуют большого объема данных на кадр; поэтому необходимо обеспечение высокой пропускной способности. Для рендеринга видео потеря данных не должна превышать 1%, а скорость обновления должна быть около 30 кадров в секунду [25].

Аудио данные определяются как непрерывный колебательный сигнал воспринимаемого голоса/звукового сигнала. Приложения VoIP передают голосовые пакеты по IP-сети, требуя при этом гарантированной полосы пропускания и очень малых задержек и вариации задержки. Для аудио модальности диапазон задержки составляет менее 150 мс, тогда как для вариации задержки должен оставаться в пределах 30 мс. Порог частоты, воспринимаемый человеческим ухом, составляет примерно 20 Гц [31], поэтому частота обновления должна быть не менее 20 кадров в секунду. В [32] было показано, что допустимая потеря данных аудио приложений должна быть ниже 1%, а пропускная способность должна быть более 200 Кбит/с.

Трехмерная графика (3D) – это представление трехмерных данных в геометрическом пространстве. Пространственное изображение составляется из элементов длины, ширины и глубины. 3D играет важную роль в создании и разработке приложений виртуальной реальности (VR) и дополненной реальности (AR) [33]. Параметры QoS для трехмерной графики были оценены в [34]: сквозная задержка колеблется от 100 мс до 300 мс, вариация задержки не должна превышать 30 мс, 3D-изображение должно периодически обновляться со скоростью 30 кадров в секунду, потеря не должна превышать 10%, а пропускная способность должна быть больше 1,2 Мбит/с.

Система телебонияния представляет собой передачу запахов через вычислительную сеть. Пользователи могут понюхать смесь запахов, находящихся в удаленном месте, используя систему ароматических датчиков в сочетании с обонятельным дисплеем. В отличие от других типов носителей, перед реализацией ароматов по запросу возникает фундаментальная проблема. Учитывая тот факт, что в носу человека обнаружены тысячи видов обонятельных рецепторов [35], исследователи сталкиваются с трудностями в создании систематической, твердой и стандартной схемы обоняния. Хотя эта тема все еще относительно мало изучена, было проведено несколько работ для определения показателей QoS телебонияния.

В [36] оценили задержку любого обонятельного проявления с точки зрения времени очищения от предыдущего запаха, времени формирования запаха и времени доставки. В [37] было проведено исследование, направленное на оценку влияния задержки передачи данных запаха на игру, когда ароматическая информация доставляется игроку в сетевой игре по сбору фруктов. Исследование показало, что для получения правильного определения запаха игроком допустимо максимальная вариация задержки менее 23 мс. Несмотря на то, что человек может указать, что источник запаха (относительно срединной или сагиттальной плоскости) составляет около 0,1 мс [16], воспринимаемая задержка колеблется от 0 до 1500 мс. Что касается пропускной способности, необходимой для передачи запахов, ольфакторная система должна полагаться на качество запахов, а не на их количество, как указано в [38], где запахи имеют различные пороги. Помимо вышеупомянутых параметров QoS для обоняния, в [36] провели исследование, в котором анализируется необходимая частота обновления для виртуального ольфакторного приложения. Было показано, что требуемая частота обновления составляет 0,1–10 Гц, а время переключения между ароматами составляет от 1 до 10 с.

Таким образом, проанализировав требования к параметрам QoS различных модальностей, а также классы QoS, можно сделать вывод, что класс QoS для каждой многомодальной системы должен выбираться индивидуально в зависимости от набора модальностей конкретной системы.

Приняв во внимание предельные значения характеристик QoS и особенности реализации многомодальных приложений, определим, что сервис передачи многомодальной информации относится к нулевому и первому и классам QoS.

#### IV. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ МНОГОМОДАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Принимая во внимание вариативность многомодальных данных следует рассмотреть требования к параметрам QoS различных модальностей.

*Размер и набор ПБД многомодального сообщения.* Определяется, как модальность кодируется и передается через сеть. Размер сообщения определяется на основе стандарта кодека, используемого для его кодирования.

*Пропускная способность.* Определяет количество информации, переданной от источника к приемнику за определенный промежуток времени.

*Задержка.* Данный параметр является одним из основных для анализа производительности сети передачи данных. Однако существует несколько подходов к измерению задержки передачи. Выделяют одностороннюю (сквозную) сетевую задержку (One Way Delay, OWD) [39] и двустороннюю (круговую) сетевую задержку (Round Trip Time, RTT [40] или IP Transfer Delay, IPTD [41]).

Односторонняя сетевая задержка является одной из ключевых метрик показателей качества IP-сетей и описана в RFC 7679 [39]. Значение этой метрики вычисляется как время передачи пакета определенного типа между двумя узлами сети. Под определенным типом по-

нимается пакет, который имеет набор заранее заданных признаков; стандарт жестко не оговаривает эти признаки, но указывает, что ими могут быть, например, размер пакета, тип приложения, сгенерировавшего пакет, тип протокола транспортного уровня, доставившего пакет, а также некоторые другие. Смысл используемого набора признаков состоит в том, чтобы выделить из общего потока пакетов, приходящего в узел назначения, те пакеты, характеристики которых интересуют специалиста, проводящего измерения [42].

Двухсторонняя сетевая задержка описана в стандарте RFC 2681 [40] и определяется как время, необходимое на передачу пакета между сетевыми узлами плюс время на получение подтверждения доставки пакета удаленным узлом. Иными словами, это временной промежуток между отправкой первого бита пакета от источника к приемнику и получением последнего бита ответного пакета от приемника к источнику.

Для системы передачи многомодальной информации общая задержка пребывания многомодального сообщения в системе складывается из следующих элементов: задержка снятия входных модальностей, задержка обработки входных модальностей и разбиения ее на ПБД, задержка распределения ПБД на субпотоки передачи, задержка передачи ПБД.

*Вариация задержки.* Определяется как разница в задержке пары сетевых ПБД [43] и обычно измеряется в микросекундах или наносекундах.

Вариация задержки  $J$  характеризует неравномерность прихода ПБД на принимающей стороне. Данный параметр определен в RFC 3393 [43]. Она может быть обусловлена перегрузкой сети в некоторых точках, большим разбросом размеров пересылаемых ПБД, что приводит к неравномерному распределению времени обработки, различными маршрутами и пр. [44].

Для расчета вариации задержки определим  $S_i$  – время отправки  $i$ -го ПБД, а  $R_i$  – время доставки  $i$ -го ПБД, тогда значения вариации задержки для ПБД с номерами  $i$  и  $j$  будет рассчитываться согласно формуле [45]:

$$D_{i,j} = (R_j - R_i) - (S_j - S_i) = (R_j - S_j) - (R_i - S_i)/$$

В [13] был также предложен метод инкрементального расчета вариации для серии ПБД:

$$J_i = J_{i-1} + (|D_{i-1,i}| - J_{i-1})/16,$$

где  $J_{i-1}$  – предыдущее значение вариации задержки. Коэффициент потерь. Определяется как процент потерь ПБД, которые были отправлены, но не доставлены приемнику.

*Период обновления значений модальностей*, который определяет сколько раз в определенный промежуток времени необходимо обновлять данные каждой модальности. Она отличается от частоты дискретизации и измеряется в Гц.

Кроме того, также следует определить модель поступления и потерь ПБД модальностей в сети (периодическая, марковская или модель Бернули).

Для систем мультипотоковой передачи данных параметры QoS позволяют оценить своевременность и производительность системы мультипотоковой передачи многомодальных данных.

В исследования не были рассмотрены параметры QoE, поскольку они должны рассматриваться для конкретного набора модальностей.

Таким образом, методику оценки эффективности можно свести к следующим шагам:

- определение пропускной способности;
- определение задержки;
- определение вариации задержки;
- определение доли потерь;
- определение показателя своевременности;
- определение показателя производительности.

Таким образом, для оценки эффективности системы передачи многомодальной информации необходимо рассмотреть показатели своевременности и производительности.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование было выполнено при поддержке гранта РФФИ «Принципы передачи многомодальной информации в роботизированных системах» (№19-37-90129).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper – Technical Report, Cisco, 2020.
2. Степанов С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. – 2015.
3. Саитов С.И., Басов О.О., Рындн А.В. Повышение степени использования канального ресурса при предоставлении услуг видеоконференцсвязи // Проблемы фундаментальной и прикладной информатики в управлении, автоматизации и мехатронике. – 2017. – С. 120-123.
4. Матвеев Ю.Н. Технологии биометрической идентификации личности по голосу и другим модальностям //Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – №. 3 (3).
5. Кагиров И.А. и др. Мультимедийная база данных жестов русского жестового языка в трехмерном формате // Вопросы языкоznания. – 2020. – №. 1. – С. 104-123.
6. Al Jaafreh M. et al. Multimodal systems, experiences, and communications: A review toward the tactile internet vision // Recent Trends in Computer Applications. – 2018. – С. 191-220.
7. Ryndin A., Pakulova E., Veselov G. Multimodal interaction: taxonomy, exchange formats // Proceedings of the 3d International Conference "Futuristic trends in Networks and Computing Technologies (FTNCT-2020)". – Springer, 2020.
8. Басов О.О., Саитов И.А. Качество функционирования и эффективность полимодальных инфокоммуникационных систем // Информатика и автоматизация. – 2014. – Т. 1, №. 32. – С. 152-170.
9. Басов О.О., Саитов И.А. Методы передачи полимодальной информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15, №. 2. – С. 293-299.
10. Pakulova E., Ryndin A., Basov O., Streev A. Principles of constructing polymodal infocommunication systems for information space user service // 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT 2017). – 2017. – Vol. .2. – IEEE, 2017. – P. 70-74.
11. ГОСТ 34.003-90 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Термины и определения. – <http://docs.cntd.ru/document/1200006979> (дата обращения: 29.06.22)

12. Надежность и эффективность в технике: справ.: в 10 т. / редсовет: В.С. Авдуевский (пред.) и др. М., 1987. Т. 2: Математические методы в теории надежности и эффективности / под ред. Б.В. Гнеденко.
13. ГОСТ 24.702-85. Эффективность автоматизированных систем управления. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2003. – 6 с.
14. Зацаринный А.А., Ионенков Ю.С. Эффективность и качество информационных систем // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2021). – 2021. – С. 297-301.
15. Ионенков Ю.С. Методический подход к оценке эффективности информационно-телекоммуникационных систем // Математическое моделирование и информационные технологии в инженерных и бизнес-приложениях. – 2018. – С. 209-217.
16. Басов О.О. Модели и метод синтеза полимодальных инфокоммуникационных систем: диссертация на соискание доктора технических наук. – СПб., 2016. – 292 с.
17. ITU-T Recommendation E.800: Definitions of terms related to quality of service. – Geneva, 2009. – 32 p.
18. ITU-T Recommendation E.430 (06/92) Telephone network and ISDN quality of service, network management and traffic engineering. Quality of service framework. – Geneva - 1992. – 3 p.
19. ITU-T Recommendation I.350 General aspects of quality of service and network performance in digital networks, including ISDNs. – Geneva, 1993. – 13 p.
20. Ferlin S. et al. BLEST: Blocking Estimation-Based MPTCP Scheduler for Heterogeneous Networks // Proc. IFIP Net- working, 2016.
21. Pakulova E., Ryndin A., Basov O. Multi-path multimodal authentication system for remote information system // Proceedings of the 12th International Conference on Security of Information and Networks. – 2019. – P. 1-4.
22. Moller S., Raake A. Quality of Experience: Advanced Concepts, Applications and Methods. T-Labs Series in Telecommunication Services. – Springer International Publishing, 2014.
23. Al Jaafreh M. et al. Multimodal systems, experiences, and communications: A review toward the tactile internet vision //Recent Trends in Computer Applications. – 2018. – P. 191-220.
24. Steinbach E., Hirche S., Ernst M., Brandl F., Chaudhari R., Kammerl J., Vittorias L.: Haptic communications // Proceedings of the IEEE. – 2012. – 100 (4). – P. 937-956.
25. Alja'Afreh M. A QoE Model for Digital Twin Systems in the Era of the Tactile Internet: дис. – Université d'Ottawa/University of Ottawa, 2021.
26. Marshall A., Yap K.M., Yu W. Providing qos for networked peers in distributed haptic virtual environments. Advances in Multimedia, 2008.
27. Hamam A., Eid M., El Saddik A., Georganas N.D. A quality of experience model for haptic user interfaces // In: Proceedings of the 2008 Ambi-Sys workshop on Haptic user interfaces in ambient media systems, ICST (Institute for Computer Sciences, Social- Informatics and Telecommunications Engineering). – 2008.
28. Liang P.P., Zadeh A., Morency L.P. Multimodal local-global ranking fusion for emotion recognition // Proceedings of the 20th ACM International Conference on Multimodal Interaction. – 2018. – P. 472-476.
29. Gilbert E.N. Capacity of a burst-noise channel // Bell system technical journal. – 1960. – 39 (5). – P. 1253-1265.
30. Cacheda R.A., Garcia D.C., Cuevas A., Castano F.J.G., Sanchez J.H., Kotsidas G., Mancuso V., Novella J.I.M., Oh S., Panto A. Qos requirements for multimedia services // In: Resource Management in Satellite Networks. – Springer, 2007. – P. 67-94.
31. Galambos R., Makeig S., Talmachoff P.J. A 40-hz auditory potential recorded from the human scalp // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 1981. – 78 (4). – P. 2643-2647.
32. Miras D., Sadagic A., Teitelbaum B., Leigh J., El Zarki M., Liu H. A survey on network qos needs of advanced internet applications. Internet 2 QoS Working Group, 2002.
33. Azuma R.T., et al. A survey of augmented reality // Presence. – 1997. – 6 (4). – P. 355-385.
34. Gracanin D., Zhou Y., DaSilva L., et al. Quality of service for networked virtual environments // Communications Magazine. – IEEE, 2004. – 42 (4). – P. 42-48.
35. Ache B.W., Young J.M. Olfaction: diverse species, conserved principles // Neuron. – 2005. – 48 (3). – P. 417-430.
36. Davide F., Holmberg M., Lundstrom I. 12 virtual olfactory interfaces: electronic noses and olfactory displays // Communications Through Virtual Technology: Identity Community and Technology in the Internet Age. – 2001. – P. 193-220.
37. Oviatt S. Multimodal interactive maps: Designing for human performance // Human-Computer Interaction. – 1997. – Vol. 12, No. 1-2. – P. 93-129.
38. Ghinea G., Ademoye O.A. Olfaction-enhanced multimedia: perspectives and challenges. Multimedia Tools and Applications. – 2011. – 55 (3). – P. 601-626.
39. Almes G., Kalidindi S., Zekauskas M., Morton A. A one-way delay metric for IPPM, STD 81, RFC 7679 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.rfc-editor.org/info/rfc7679>, DOI 10.17487/RFC7679.
40. Almes G., Kalidindi S., Zekauskas M. A Round-trip Delay Metric for IPPM, RFC 2681 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.rfc-editor.org/info/rfc2681>, DOI 10.17487/RFC2681.
41. ITU-T Y.1565 Quality of service and network performance.
42. Виноградов Н.И. Исследование принципов построения и разработка устройства для измерения метрик производительности ip сетей на основе временной синхронизации глонасс: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», 2017. – 106 с.
43. Demichelis C., Chimento P. IP packet delay variation metric for IP performance metrics (IPPM). – RFC 3393, November, 2002. – P. 21.
44. Minhas T.N. Network impact on quality of experience of mobile video. – 2012.
45. Кузовлев А.В. Контроль качества в сетях IP // Техника связи. – 2009. – №. 3-4. – С. 20-24.

# Программа интерактивной визуализации магнитных и электрических полей

Назаренко Алексей Фёдорович

Специальная астрофизическая обсерватория РАН,  
Нижний Архыз, Россия.  
*naf@sao.ru*

Глаголевский Юрий Владимирович

Специальная астрофизическая обсерватория РАН,  
Нижний Архыз, Россия  
*glagol@sao.ru*

**Аннотация.** Представлена программа визуализации магнитных и электрических полей, позволяющая в интерактивном режиме моделировать стационарные магнитные и электрические поля из неограниченного количества электрических зарядов или магнитных монополей произвольной напряженности. Используется для исследования структуры химически пекулярных магнитных звёзд.

**Abstract.** A program for visualizing magnetic and electric fields is presented, which allows you to interactively simulate stationary magnetic and electric fields from an unlimited number of electric charges or magnetic monopoles of arbitrary intensity. It is used to study the structure of chemically peculiar magnetic stars.

**Ключевые слова:** магнитные звёзды, силовые линии, линии равной напряженности, визуализация физических полей.

**Keywords:** magnetic stars, force lines, lines of equal intensity, visualization of physical fields.

Существует много программ визуализации физических полей. Часть из них входят в состав дорогостоящих программных комплексов, другие являются узкоспециализированными, предназначеными для решения конкретных задач. В нашем случае понадобилась тоже специальная программа для графического представления структур магнитных полей химически пекулярных звезд.

В современном понимании магнитное поле звезды формируется расположенным в её объёме магнитными диполями. В результате вращения звезды, наблюдатель регистрирует изменяющийся световой поток, содержащий сведения о величине переменного магнитного поля. Далее необходимо решить обратную задачу: по наблюдаемому магнитному полю, меняющемуся в зависимости от фазы вращения звезды (угла поворота звезды к наблюдателю) определить напряженность и направление силовых линий магнитных диполей, обеспечивающих наблюдаемый эффект.

Не касаясь самой задачи поиска размера, ориентации и напряженности магнитных диполей в теле звезды, в процессе её решения оператору (астроному) приходится рассматривать множество различных вариантов конфигураций магнитных полей звезды, формируемых находящимися в её объёме магнитными диполями. Настоящая программа позволяет в интерактивном режиме создавать, удалять, изменять положение магнитных диполей и графически отображать результирующее магнитное поле – рисовать и удалять изображение магнитной силовой линии в любой точке плоскости сечения объёма звезды.

Автоматически отобразить поле одиночного диполя сравнительно легко, но для двухдипольных систем, а тем более для многодипольных систем автоматически рассчитать удобочитаемую картину магнитных силовых линий весьма затруднительно. Программа по сути является интерактивным редактором многодипольных систем, позволяющим в ручном режиме конфигурировать положение и мощность диполей и рисовать магнитные силовые линии проходящие через любую точку исследуемой плоскости сечения звезды.

Несмотря на прямое назначение программы - графического изображения магнитных силовых линий от магнитных диполей, программа универсальна в том смысле, что дает возможность конфигурировать и изображать силовые линии и любого электростатического поля. То есть задать на плоскости положение любого количества положительных и отрицательных точечных зарядов произвольной напряженности и нарисовать прохождение силовой линии через любую точку плоскости. В общем случае программа позволяет визуализировать поле неограниченного количества и положительных и отрицательных точечных зарядов (а для магнитных полей северных и южных полюсов - монополей) различной напряженности. Но для нашей задачи, изучения магнитных полей звёзд, реально определены параметры для множества одно- и двухдипольных звёзд, и только для нескольких трёхдипольных магнитных звёзд [1].

Аналогичным образом можно визуализировать силовые линии тяготеющих масс, если их размеры можно принять за точку.

Для визуализации физических полей иногда важно отображать не силовые линии (по сути линии максимального градиента поля), а линии равной напряженности – изолинии (изофоты, изобары, изотермы и т.п.). Программа позволяет отображать в интерактивном режиме и линии равной магнитной или электрической напряженности.

Программа написана на языке Python 3.4 (Red Hat 4.4.7-18)] on linux. Работа оператора происходит за терминалом с использованием дисплея с клавиатурой и мышкой. В полном объёме работа программы описана в инструкции пользователя.

На следующих двух рисунках приведены примеры работы программы: распределение магнитных силовых линий и линий равной магнитной напряженности звезды HD 149438.

Серое пятно в центре звезд – конвективное ядро, в котором магнитные силовые линии запутаны турбулентными движениями вещества.

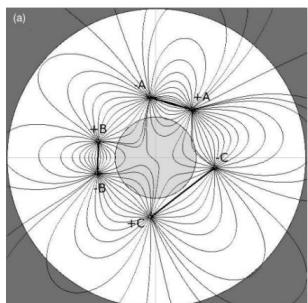


Рис 1. Магнитные силовые линии трёхдипольной магнитной звезды HD 149438

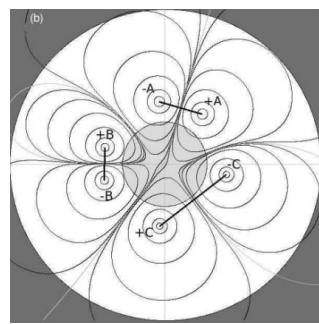


Рис 2. Линии равной магнитной напряженности трёхдипольной магнитной звезды HD 149438.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Глаголевский Ю.В., Назаренко А.Ф. Три трёхдипольные звезды // Астрофизический бюллетень. – 2017. – Т. 72, № 4. – С. 450

## Секция III

# ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

DOI: 10.18522/syssyn-2022-29

## Построение онтологической модели компьютерного преступления

**Абрамов Евгений Сергеевич**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия

*abramoves@sfedu.ru*

**Геворгян Рафаэл Артурович**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия

*rafael.gevorgyan@mail.ru*

**Аннотация.** В статье представлены результаты разработки информационной модели компьютерного преступления с использованием онтологического подхода на базе существующих моделей сценариев компьютерных атак, учитывающая все элементы преступления, криминалистически-значимые характеристики элементов, систему связей и зависимостей между элементами. Модель также может применяться для моделирования и исследования преступлений путём обобщения сведений о характеристиках элементов, что необходимо для изучения новых типов преступлений, выработки методик их расследования, определения тенденций развития киберпреступности.

**Abstract.** The article presents the results of developing an information model of a computer crime using an ontological approach based on existing models of computer attack scenarios, taking into account all the elements of the crime, forensically significant characteristics of the elements, the system of links and dependencies between the elements. The model can also be used to model and study crimes by summarizing information about the characteristics of elements, which is necessary for studying new types of crimes, developing methods for investigating them, and determining trends in the development of cybercrime.

**Ключевые слова:** модель компьютерного преступления, онтология, компьютерная криминастика.

**Keywords:** computer crime model, ontology, computer forensics.

### I. МОДЕЛЬ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРЕСТУПЛЕНИЯ

В данной статье представлены результаты разработки информационной (цифровой) криминалистической модели преступления, на основе анализа криминалистической характеристики преступлений, существующих подходов к построению моделей КП, и онтологического подхода к построению моделей кибератак. Также рассмотрены основные требования к такой модели. В даль-

нейшем термины «цифровая криминалистическая модель компьютерного преступления» и «информационная модель компьютерного преступления» будут использоваться как синонимы.

### II. ТРЕБОВАНИЯ К РАЗРАБОТКЕ КРИМИНАЛИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРЕСТУПЛЕНИЯ

В теории криминастики криминалистическая характеристика преступлений – это научная абстракция, в которой находит отражение в обобщенном виде совокупность взаимосвязанных, криминалистически значимых данных о преступлениях определенного вида/разновидности, знание которых позволяет методически правильно организовать расследование и в частности определить типовые следственные версии. Является одним из элементов частной криминалистической методики, представляющий собой систему сведений о типичных криминалистически значимых признаках преступлений и связях между ними, знание которых помогает в выдвижении версии о совершенном преступлении.

Для расследования компьютерных преступлений принципиально важно иметь их цифровые модели, которые будут максимально адаптированы к использованию в цифровой среде и с инструментарием, предназначенным для работы с компьютерной информацией.

Важно заметить, что такая модель именно цифровая, поскольку в своем содержании имеет выражение свойств преступлений в виде математических/формальных символов и должна быть представлена в машиночитаемой кодировке. Здесь на первый план выходит машинное моделирование, под которым понимается реализуемый на вычислительной машине метод исследования, предполагающий замену реального процесса его математической моделью [1].

Ключевая особенность такой модели: в достижении цели противодействия киберпреступности она должна позволять анализировать различные специфические объекты цифровой среды, нестандартную сетевую активность, паттерны поведения в Интернет-пространстве и т.п. Модель должна являться инструментом установления криминального события того или иного вида по его цифровым следам. Для компьютерных преступлений следует учитывать, что одним и тем же способом могут совершаться различные виды преступлений.

Сформулируем требования общего характера к таким моделям:

- 1) отсутствие избыточности в ее математическом описании;
- 2) адекватность, состоящая в наиболее точном воспроизведстве конкретного вида преступлений как объекта-оригинала;
- 3) обеспечение прозрачности получаемого результата для человека и машины, заключающейся в «его понятности пользователю не математику и в то же время пригодности для дальнейшей обработки в качестве компьютерной информации» [2];
- 4) релевантность элементов, т.е. воспроизведение тех признаков и закономерностей, которые необходимы именно для выявления, расследования и предупреждения преступных деяний;
- 5) использование определений признаков из соответствующей предметной области, выражющихся системой понятий, присущих объектам-оригиналам.

Способы компьютерных преступлений являются полноструктурными [3], поэтому могут быть выбраны различные способы подготовки, совершения и сокрытия, слабо коррелирующие с видом преступления.

Полноструктурный способ (структура способа состоит из подготовки, совершения и сокрытия преступления).

Усеченный способ:

- Подготовка, совершение (сокрытие возможно в комплексе действий по подготовке и совершению преступлений).
- Только действия по совершению преступления (преступления с внезапно возникшим умыслом, в состоянии алкогольного/наркотического опьянения, в состоянии аффекта).
- Совершение и сокрытие преступления (преступления с внезапно возникшим умыслом).
- Сокрытие преступления – совершается, как правило, заинтересованными лицами и без ведома исполнителя.

### III. АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ И ПОДХОДОВ К РАЗРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРЕСТУПЛЕНИЯ

Согласно [4], основным принципом формирования информационно-компьютерных моделей должна являться возможность ранжировать их по сложности спосо-

бов реализации противоправных действий, включая используемые ИТ-технологии и корреляции с этими способами уровня компетенции преступников, состава преступной группы или сообщества. Корреляционные связи существуют также между способом компьютерного преступления и компьютерной грамотностью потерпевшего, которая также может иметь разные уровни компетентности. Информационно-компьютерные модели компьютерных преступлений при обобщении больших массивов информации могут служить одним из основных элементов частных криминалистических методик расследования. Учитывая эти принципы, а так же требования 1-5 и предыдущего раздела, проанализируем существующие подходы к разработке цифровой криминалистической модели компьютерного преступления.

Несмотря на давно появившуюся потребность в подобных моделях, лишь относительно недавно начали появляться исследования, ставящие целью разработку модели КП как системы криминалистически значимых взаимовлияющих элементов и связей между ними. Даный подход является онтологическим [5], в отличие от ранее предлагавшихся подходов на основе таксономий.

Таксономия учитывает один тип отношений, тогда как онтология учитывает множество различных сложных отношений между концепциями.

Онтология, является более сложной формой категоризации. Можно сказать, что это сложный вариант таксономии. Он включает в себя форму таксономии иерархической структуры для категоризации, но также включает в себя произвольные сложные отношения для классификации понятий. Эти произвольные сложные отношения показывают различные отношения между концепциями, отличными от простых родительско-дочерних отношений. Здесь одна категория может быть связана с несколькими другими категориями.

Далее представлено краткое изложение существующих подходов к построению моделей и классификации компьютерных преступлений.

Общепринятый подход, используемый для классификации киберпреступлений в целом и используемый в некоторых из цитируемых исследований, заключается в том, чтобы сосредоточиться на роли технологий в совершении преступления.

В этом общепринятом подходе киберпреступления классифицируются как одна из двух дихотомий высшего уровня: «преступления с использованием компьютеров» или «преступления, нацеленные на компьютеры». Согласно [6], «преступления с использованием компьютера» – это преступления, которые предшествовали Интернету, но получили новую жизнь в киберпространстве, т.е. мошенничество, воровство, отмывание денег, сексуальные домогательства, разжигание ненависти и порнография, а «преступления нацеленные на компьютеры» – это те преступления, которые возникли одновременно с созданием Интернета и не могли существовать отдельно от него, т.е. взлом, вирусные атаки и порча веб-сайтов. Очевидно, такой бинарный подход не может служить основой для систематизации быстро меняющихся КП.

В работе [7] предложена таксономия и онтологическая структура классификации компьютерных сетевых атак, которая позволяет классифицировать сетевые атаки по классам: сценарий атаки, субъект, местоположение субъекта, агрессор, цель атаки, мотивация, область действия, уязвимость, актив, эффект, фаза, механизм атаки и уровень автоматизации. Внутри каждого класса предоставляется дополнительная информация для классификации сетевых атак. Хотя эта онтологическая структура ориентирована исключительно на атаки на компьютерные сети, ее стиль и структура основываются на общепринятой в сфере информационной безопасности терминологии и типовых подходах к классификации атакующих действий. При этом с точки зрения модели КП классификация определяют дополнительные классы/характеристики, которые можно использовать для классификации КП. К недостаткам предложенного онтологического подхода можно отнести то, что он ориентирован исключительно на атаки на компьютерные сети и не может обрабатывать целый ряд КП, в частности совершенных против отдельных лиц, а также не может представлять смешанные типы атак.

В работе [8] предложена онтология для классификации киберпреступлений. Основными понятиями, представленными в онтологии, являются: действие, агент, контакт, внешний наблюдатель, воздействие, местоположение, мотивация, акт социальной инженерии, цель, технологическая роль и точка зрения. Представленная онтология является информативной, поскольку она предлагает несколько характеристик для классификации киберпреступлений, пытаясь дать комплексное представление о КП. К недостаткам онтологии относятся то, что она изначально разрабатывалась для оценки влияния КП на общество, на «внешнего наблюдателя». Кроме того, не используются такие элементы КП, как уязвимость, эксплуатационное и информационное воздействие.

Ни одна из рассмотренных работ не предлагает достаточно целостной модели для описания КП, т.к. они не могут учитывать целый ряд постоянно меняющихся типов КП и неспособны учитывать сложные взаимодействия между преступником (атакующим), жертвами, воздействиями, местоположениями, мотивами и собственно событием преступления.

Таким образом, существующие модели на основе таксономического подхода недостаточны, узки по своему охвату, поскольку каждая из них фокусируется на отдельных точках зрения (например, роль компьютера, атака, точка зрения злоумышленника или защитника) или используют разные терминологии для обозначения одного и того же объекта. Кроме того, они не могут эффективно представлять диапазон постоянно обновляющихся типов компьютерных преступлений. Онтологический подход важен для предметной области, поскольку одно и то же КП может классифицироваться следователями по-разному, что приводит к неточному выявлению тенденций и моделей преступления. Разрабатываемая модель должна избежать этих ограничений путем использования более полной онтологии классификации КП, которая включает несколько точек зрения (например, событие преступления, злоумышленника, воздействие, мотив, жертва, цель, заявитель, уязвимость, сред-

ства совершения преступления, местонахождение (источник воздействия) и само правонарушение), расширяя таким образом количество знаний в модели.

Разрабатываемая информационная модель КП должна отвечать следующим требованиям:

1. Использование общепринятой в сфере информационной безопасности терминологии и подходов к онтологическому описанию КП.
2. Включать разные точки зрения для анализа КП и систему взаимосвязей между элементами, предоставляющими эти точки зрения.
3. Иметь гибкую расширяемую структуру элементов, представленную в виде формальной онтологической модели взаимодействия элементов.

Такая модель позволит не только более полно описывать совершаемые КП, но и иметь возможность расширяться под новые элементы и типы КП. Использование формального описания должно упростить обмен знаниями в экспертном сообществе и между программным обеспечением.

#### IV. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРЕСТУПЛЕНИЯ

Основываясь на результатах проведённого анализа и на сформулированных требованиях, перейдём к разработке модели.

Для реализации модели КП в по схеме «сущность-связь» решено было использовать ER-диаграммы.

Схема «сущность-связь» (также ER или ER-диаграмма) – это разновидность блок-схемы, где показано, как разные «сущности» (люди, объекты, концепции и так далее) связаны между собой внутри системы. ER-диаграммы чаще всего применяются для проектирования и отладки реляционных баз данных в сфере образования, исследования и разработки программного обеспечения и информационных систем для бизнеса. ER-диаграммы (или ER-модели) полагаются на стандартный набор символов, включая прямоугольники, ромбы, овалы и соединительные линии, для отображения сущностей, их атрибутов и связей. Эти диаграммы устроены по тому же принципу, что и грамматические структуры: сущности выполняют роль существительных, а связи – глаголов.

В ER-моделях и моделях данных обычно выделяют до трех уровней детализации:

*Концептуальная модель данных* – схема наивысшего уровня с минимальным количеством подробностей. Достоинство этого подхода заключается в возможности отобразить общую структуру модели и всю архитектуру системы. Менее масштабные системы могут обойтись и без этой модели. В этом случае можно сразу переходить к логической модели.

*Логическая модель данных* содержит более подробную информацию, нежели концептуальная модель. На этом уровне определяются более подробные операционные и транзакционные сущности. Логическая модель не зависит от технологии, в которой она будет применяться.

*Физическая модель данных:* на основе каждой логической модели данных можно составить одну или две физических модели. В последних должно присутствовать достаточно технических подробностей для составления и внедрения самой базы данных.

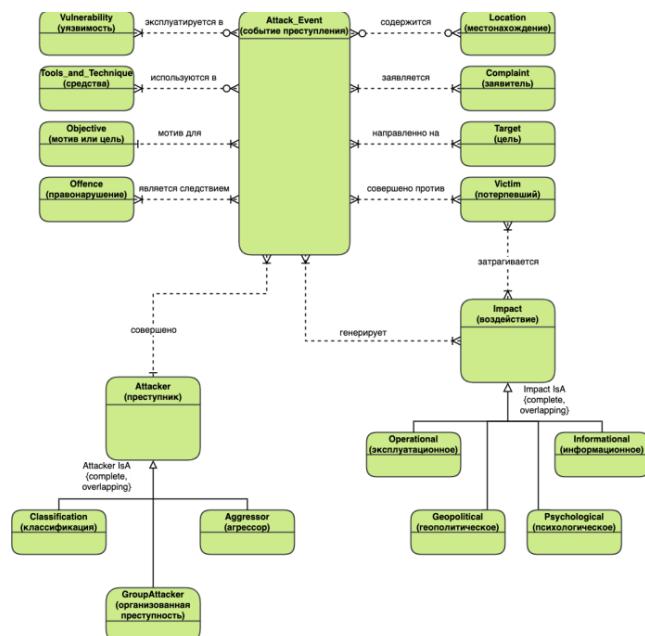
Одними из основных областей применения ER-диаграмм, важных с точки зрения применимости для разработки модели КП, являются:

1. Информационные системы для бизнеса. ER-схемы используются для проектирования и анализа реляционных баз данных, применяемых в бизнес-процессах. Реляционные базы данных могут пригодиться в любом бизнес-процессе, где задействованы данные, разбитые на поля, включая сущности, действия и взаимосвязи. Базы данных помогают оптимизировать процессы, извлекать данные и повышать качество результатов.

2. Исследовательская деятельность. Поскольку исследовательская работа во многом опирается на четко структурированные данные, ER-диаграммы играют ключевую роль в построении оптимальных баз данных для анализа информации.

Таким образом, модель КП, разработанная на основе ER-диаграммы, может представлять компьютерное преступление как систему (под структурой системы понимают состав ее элементов и постоянные связи между ними), и учитывать основные элементы КП, их характеристики (атрибуты) и связи между ними.

Разработанная концептуальная информационная модель компьютерного преступления представлена на рисунке 1. Эта модель определяет основные элементы КП, характеристики элементов в виде атрибутов, и отношения между ними. Характеристики элементов концептуальной модели обсуждаются ниже. Модель разработана с возможностью расширения, и при необходимости в ней могут быть добавлены дополнительные элементы, характеристики и отношения.



*Рис. 1. Концептуальная информационная модель компьютерного преступления*

*Событие преступления Attack\_Event* – это КП в реальном мире, связанное с использованием компьютеров, или преступление, совершенное злоумышленником полностью в цифровом пространстве. Важными характеристиками являются, в т.ч., даты начала и окончания **Attack\_Event** – если они известны, либо надо предпринимать действия по их установлению (*+StartTime, +EndTime*).

Уязвимость **Vulnerability** – это недостаток или слабое место в системе, которое используется Преступником (**Attacker**) в **Attack\_Event**. Таким образом, уязвимость применима только к событию преступления, совершенному против информационно-коммуникационной техники. Существует большое множество классификаций уязвимостей автоматизированных систем (NVD/CVE, ФСТЭК и др.), рассмотрение которых выходит за рамки этой НКР. В настоящем исследовании уязвимости классифицируются следующим образом: уязвимость реализации (*+ImplementationVulnerability*), уязвимость проектирования (*+DesignVulnerability*), уязвимость конфигурации (*+ConfigurationVulnerability*) и уязвимость политики безопасности (*+SecurityPolicyVulnerabilit*).

**Средства Tool\_and\_Technique** можно рассматривать как инструментальные средства и методы (т.е. инструменты и/или техники), используемые Преступником (**Attacker**) для выполнения **Attack\_Event**. В модели используются следующие характеристики **Tool\_and\_Technique**: средства (+*Tool*), социальная инженерия (+*SocialEngineering*), тайный сговор (+*IllicitCollusion*) и вектор атаки (+*AttackVector*).

**Motiv Objective.** Мотив можно рассматривать как главную цель, мотив или конечную задачу преступника (**Attacker**) совершающего **Attack\_Event**. Некоторые характеристики: месть (+*revenge*), обогащение (+*enrichment*), ненависть (+*hatred*), хулиганство (+*bullying*), самосохранение (+*SelfPreservation*) и мораль (+*moral*).

**Правонарушение Offence.** Правонарушение может являться отсылкой к определениям незаконных действий в отношении компьютерной информации, используемым в статьях УК РФ (272-274 статьи). Примером может служить «неправомерный доступ к компьютерной информации» [9].

**Расположение Location.** Расположение затрагивает пять других элементов: Преступник, событие преступления, жертва, заявитель и цель (соответственно **+Attacker**, **+Attack\_Event**, **+Victim**, **+Complainant**, **+Target**). Местонахождение относится к стране (как правило) и/или конкретному адресу преступника/преступной группы, жертвы и/или цели, с которой происходит событие **Attack\_Event**, заявителя, который сообщает о событии преступления **Attack\_Event**, и откуда запускается событие преступления. Событие преступления **Attack\_Event** может быть запущено из нескольких источников.

**Заявитель Complainant.** Заявитель – это тот, кто сообщает о событии преступления, информируя власти о незаконной деятельности. Заявитель может частным лицом или организацией (*+private*, *+group* и *+organization*). Кроме того, заявитель может быть или не быть жертвой. Например, если домашний компьютер

причастен к КП, его владелец может быть одновременно и потерпевшим, и заявителем. Но взломанный ПК в организации означает, что потерпевшей стороной становится организация, а сотрудник, работавший на ПК – заявителем, хотя воздействие (**Impact**) будет направлено на него.

**Потерпевший Victim.** Потерпевший (или жертва преступления) – это объект, на который каким-то образом влияет событие преступления **Attack\_Event**. Характеристики **Victim**: **+IndividualVictim**, **+GroupVictim**, **+OrganizationVictim**, **+GovernmentVictim**. Потерпевший может быть или не быть конкретной целью преступления. Если **Потерпевший** был конкретной целью, то значения **Victim** и **Target**(цель) совпадают. С другой стороны, если, например, **Преступник** массово распространяет вирус, **Потерпевший** не обязательно является конкретной Целью, но становится жертвой преступления в зависимости от наличия Уязвимости в конкретной автоматизированной системе.

**Цель Target.** Цель – это объект, на который конкретно направлено событие преступления **Attack\_Event**. Для идентификации цели используются следующие характеристики: **+TargetInfrastructure**, **+TargetPersonalDevice**, **+TargetNetworkDevice**, **+TargetOrganization**, **+TargetIndividual**, **+TargetGovernment**, **+TargetGroup**, **+TargetSoftware**, **+TargetSite**, **+TargetSkills**. Необходимо отметить, что **Attack\_Event** может включать одну или несколько целей.

**Влияние Impact.** Воздействие может быть определено как прямое воздействие события преступления на жертву. В данном исследовании в качестве характеристик воздействия используются эксплуатационный (включающий операционный и экономический эффект), информационный, психологический и геополитический эффект.

**Преступник Attacker.** Преступник может быть определен как объект, который пытается совершить или совершает преступление **Attack\_Event** способом, определенным в перечне **Правонарушений**. Классификация выделена в отдельный элемент, так как она:

- важна;
- изменчива;
- может применяться несколько классификаций одновременно.

Преступник может быть как одиночкой, так и группой. В НКР используются четыре типа **GroupAttacker**: **+OrganizedCriminalGroup**, **+StateGroup**, **+SexualGratificationGroup**, **+IdeoliticalGroup** [10].

Преступник может быть Агрессором. Согласно [7] Агрессор характеризует причину вовлечённости Преступника в Преступление, а не тип Преступника. То есть Преступник может быть нанят для совершения КП, либо это может входить в его должностные обязанности и он получил санкцию на совершение **Attack\_Event**. Характеристики Агрессора: **+State**, **+Commercial**, **+Individual**, **+SelfIncited**, **+Unknown**. Следует отметить, что когда атакующий и агрессор совпадают, применяется **SelfInstigator** (Самостоятельный исследователь) [7].

Кроме того, обязательной характеристикой Преступника является уровень владения компьютерными технологиями **+TargetSkills**.

## V. Возможности применения информационной модели компьютерного преступления

Разработанная модель предоставляет возможность и необходимость моделирования компьютерных преступлений путем обобщения на основе изучения больших массивов уголовных дел сведений о криминалистически значимых характеристиках вида преступления и их закономерных связях между собой [4].

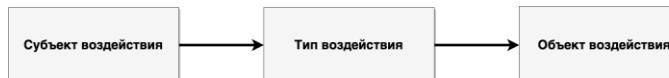
На основании выделения общности способов для различных видов преступлений, совершаемых с использованием компьютерных средств и систем, возможно формирование информационно-компьютерных моделей преступлений, которые будут отличаться предметами посягательства и потерпевшей стороной, а так же учитывать информацию об уровне владения компьютерными технологиями преступника и потерпевшей стороны [11].

Другим примером является изучение компьютерных атак на локальные корпоративные сети. Эти атаки могут быть как внешними, так и производиться изнутри организации с участием её сотрудников. Заметим, что преступник-инсайдер может использовать вредоносные программы, как и внешний нарушитель. Причем его участие может быть опосредованным путем предоставления соучастникам сведений, необходимых для несанкционированного доступа к корпоративной компьютерной сети, в том числе об уязвимых местах в программном обеспечении либо ошибках в настройках сетевого оборудования. Подобные факты и закономерности также позволяет учитывать разработанная модель компьютерного преступления.

Рассмотрим возможность применения модели КП при разработке синтезирующей части экспертного заключения на примере «Заключения комиссии экспертов от 03 июня 2021 года (первичная комплексная комиссионная компьютерно-техническая судебная экспертиза по уголовному делу №11707070001100041)» [12].

Для синтеза заключения о наличии незаконных функций в рассматриваемом ПО (тех, которые приводят к уничтожению, блокированию, модификации, копированию компьютерной информации и нейтрализации средств защиты компьютерной информации) экспертам необходимо описать схемы вредоносных программных воздействий на компьютерную информацию (КИ), циркулирующую в ИС. С точки зрения разработанной модели необходимо установить характеристики элемента **Offence** по известным характеристикам **Tool\_and\_Technique** и **Victim/Target**, уже установленным ранее в ходе КТЭ.

Необходимо отметить, что сейчас данное решение не имеет чётко установленных параметров для отнесения их к уголовно наказуемым деяниям, и целиком должно являться результатом профессионализма экспертов. Для решения задачи эксперты использовали модель описания вредоносного программного воздействия (рисунок 2) в виде набора элементов  $\{ \text{субъект воздействия}_i, \text{тип воздействия}_{i+1}, \dots, \text{тип воздействия}_N, \text{объект воздействия} \}$  [12].



*Рис. 2. Модель описания вредоносного программного воздействия*

Уже на данном этапе видно, что предложенная экспертами модель воздействия укладывается в разработанную модель КП с использованием элементов:

- Tool\_and\_Technique.
- Target.
- Impact.
- Victim.

Под *субъектом воздействия* понималось конкретное вредоносное программное обеспечение (ВПО), реализующее заведомо вредоносные функции, специально разработанное для осуществления преступления. В терминах модели это Tool\_and\_Technique.

Под *объектом воздействия* понималась конкретная компьютерная информация, подвергнувшаяся воздействию ВПО (Victim/Target). В данном случае Victim и Target совпадают.

Под *типов воздействия i* понимались один или несколько из перечисленных методов вредоносного программного воздействия:

- модификация КИ;
- уничтожение КИ;
- блокирование КИ;
- копирование КИ;
- нейтрализация (обход) средств защиты КИ.

В терминах модели это Offence.

Далее рассмотрим подробно схемы вредоносных программных воздействий отталкиваясь от субъектов воздействия.

Одна из схем вредоносного программного воздействия представляется в виде следующего набора элементов:

*{неоригинальное ПО, блокирование исполнения оригинального ПО, оригинальное ПО}*

Таким образом устанавливается, что использование неоригинального ПО приводит к несанкционированному блокированию приложения оригинального ПО, то есть к невозможности осуществлять требуемые операции с компьютерной информацией ИС. С точки зрения модели КП устанавливается одна из характеристик элемента Offence – «блокирование КИ».

Другая схема вредоносного программного воздействия представлялась в виде следующего набора элементов:

*{троянское программное обеспечение, (нейтрализация средств защиты, модификация загрузчика), оригинальное ПО}*

Исходя из этого формулируется, что использование неоригинального ПО приводит к нейтрализации средств защиты и несанкционированной модификации компьютерной информации оригинального ПО ИС, путем изменения алгоритма его работы. С точки зрения модели КП устанавливаются еще две характеристики элемента Offence – «модификация КИ», «нейтрализация (обход) средств защиты КИ».

Аналогичным образом можно представить с использованием модели все синтезирующие схемы из заключения.

Необходимо обратить внимание, что КТЭ не устанавливает вину подозреваемых – и как видно из выше-приведённого анализа, данные действия проводятся без привлечения характеристик элемента Attacker, исключительно с анализом программно-технических средств воздействия Tool\_and\_Technique.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В главе 2 проведён анализ требования к разработке криминалистической модели компьютерного преступления, сформулирован собственный набор требований. Проведён анализ подходов к разработке информационной модели компьютерного преступления, выбран онтологический подход на основе схемы «сущность-связь» с использованием ER-диаграмм. Разработана концептуальная информационная модель компьютерного преступления. Проведено исследование возможности применения разработанной информационной модели компьютерного преступления при проведении КТЭ на основе реального заключения экспертов.

В результате разработана информационная модель компьютерного преступления с использованием онтологического подхода на базе существующих моделей сценариев компьютерных атак, учитывающая все элементы преступления, криминалистически-значимые характеристики элементов, систему связей и зависимостей между элементами.

Модель также может применяться для моделирования и исследования преступлений путём обобщения сведений о характеристиках элементов, что необходимо для изучения новых типов преступлений, выработки методик их расследования, определения тенденций развития киберпреступности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов А.А. Монография «Искусственный интеллект и математическая статистика в криминалистическом изучении преступлений». – Изд-во: Проспект. – ISBN: 978-5-392-34143-6, 816 стр. 2021 г.
2. Бессонов А.А. Цифровая криминалистическая модель преступления как основа противодействия киберпреступности // Академическая мысль. – 2020. – № 4 (13).– С. 58-61.
3. Бессонов А.А. Способ преступления как элемент его криминалистической характеристики // Проблемы в российском законодательстве. – 2014. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposob-prestupleniya-kak-element-ego-kriminalisticheskoy-harakteristiki> (дата обращения: 01.09.2022).
4. Россинская Е.Р., Семикаленова А.И. Информационно-компьютерные криминалистические модели компьютерных преступлений как элементы криминалистических методик (на примере "кибершантажа") // Вестн. Том. гос. ун-та. Право. – 2021. – № 42. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionno-kompyuternye-kriminalisticheskie-moldeli-kompyuternyh-prestupleniy-kak-elementy-kriminalisticheskikh-metodik-na> (дата обращения: 01.09.2022).

5. *Donalds C., Osei-Bryson K.M.* Toward a cybercrime classification ontology: A knowledge-based approach //Computers in Human Behavior. – 2019. – Т. 92. – С. 403-418.
6. *Furnell S.* Cybercrime: Vandalizing the information society. – London: Addison-Wesley, 2002. – С. 3-540.
7. *Van Heerden R.P. et al.* A computer network attack taxonomy and ontology // International Journal of Cyber Warfare and Terrorism (IJCWT). – 2012. – Т. 2, №. 3. – С. 12-25.
8. *Barn R. & Barn B.* (2016, June12-15). An ontological representation of A taxonomy for cybercrime. Paper presented at the 24th european conference on information systems (ECIS), istanbul,Turkey.
9. Уголовный кодекс РФ (УК РФ 2015) (с изменениями на 30 декабря 2015 года) [Электронный ресурс]. – <http://docs.ctnd.ru/document/ugolovnyj-kodeks-rf-uk-rf>, (дата обращения: 25.08.2022).
10. *Donalds C., & Osei-Bryson K.-M.* A cybercrime taxonomy: Case of the jamaican jurisdiction. Paper presented at the CONFIRM 2014 proceedings. – 2014.
11. *Россинская Е.Р.* Концепция учения об информационно-компьютерных криминалистических моделях как основе методик расследования компьютерных преступлений // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. – 2021. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-ucheniya-ob-informatsionno-kompyuternyh-kriminalisticheskikh-modelyah-kak-osnove-metodik-rassledovaniya-kompyuternyh> (дата обращения: 22.08.2022).
12. «Заключение комиссии экспертов от 03 июня 2021 года (первичная комплексная комиссионная компьютерно-техническая судебная экспертиза по уголовному делу №11707070001100041)».

# Обеспечение информационной безопасности при проектировании инфокоммуникационных систем

**Лившиц Марина Владимировна**

Кафедра Автоматики и процессов управления  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
Санкт-Петербург, Россия  
*marina.livshits24@gmail.com*

**Шестопалов Михаил Юрьевич**

Кафедра Автоматики и процессов управления  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
Санкт-Петербург, Россия  
*shestopalov\_08@mail.ru*

**Аннотация.** В работе рассматривается проблема обеспечения информационной безопасности (ИБ) при проектировании инфокоммуникационных систем (ИКС), вызванная необходимостью отслеживания большого количества событий информационной безопасности в соответствии с руководящими документами по защите от несанкционированного доступа. Рассмотрены способы обеспечения информационной безопасности на всех этапах жизненного цикла проектирования инфокоммуникационных систем. Предложен новый метод, включающий алгоритм обработки сообщений и ряд методов преобразования и структурирования, позволяющий сократить вычислительную нагрузку, выбрать меры противодействия.

**Abstract.** The article considers the problem of ensuring information security (IS) in the design of infocommunication systems (ICS), caused by the need the logging of a large number of information security events in accordance with the guidelines for protection against unauthorized access. The ways of ensuring information security at all stages of the life cycle of designing infocommunication systems are considered. A new method is proposed, which includes a message processing algorithm and a number of transformation and structuring methods, which makes it possible to reduce the computational load and select countermeasures.

**Ключевые слова:** инфокоммуникационные системы, информационная безопасность, несанкционированный доступ, меры противодействия, декодирование событий, модели событий, обеспечение безопасности информации, сбор регистрируемых событий.

**Keywords:** *infocommunication systems, information security, unauthorized access, countermeasures, event decoding, event models, information security, collection of registered events.*

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время средства обработки и распределения информации и информационные системы в целом характеризуются высокими темпами разработки. Появление новых систем обработки информации и появление новых более мощных средств вычислительной техники способствует более повсеместному применению средств связи в различных сферах прикладных задач. С другой стороны, развитие информационных и телекоммуникационных систем требует применения современных цифровых каналов и систем обработки информации в процессе ее передачи. Важный результат подобной коллоквации телекоммуникационных сетей и средств информатизации – появление понятия инфокоммуникационной системы.

Инфокоммуникационная система – это система, включающая в себя сущности информационной и телекоммуникационной систем. Согласно определению информационная система [1] включает в себя информацию и пользователя, телекоммуникационная система обеспечивает передачу информации от источника к потребителю. Таким образом, совокупность телекоммуникационных сетей, средств хранения и обработки информации и подсистемы пользователей (источники и потребители информации) образуют инфокоммуникационную систему.

Состав инфокоммуникационной системы представлен на рис. 1.



Рис. 1. Инфокоммуникационная система

Ввиду сложности организации инфокоммуникационных систем, и соответственно большого количества возможных уязвимостей информационной безопасности ИКС, предлагается обеспечить безопасное проектирование инфокоммуникационных систем на всех этапах жизненного цикла процесса проектирования.

Жизненный цикл проектирования ИКС – это условная схема, которая содержит в себе все этапы, через которые ИКС проходит от формирования в виде идеи до сопровождения и поддержки в процессе эксплуатации на объекте. Основные этапы разработки ИКС представлены на рис. 2.



Рис. 2. Основные этапы проектирования ИКС

Из множества угроз ИБ ИКС в данной работе рассматриваются атаки, связанные с несанкционированным доступом по внешним и внутренним каналам связи,

включая доступ в операционную среду, доступ к защищаемой информации, программным воздействием на ресурсы комплекса, включая использование вредоносных программ [2].

ИКС является системой, подлежащей защите от несанкционированного доступа к информации по классу защищенности АС 1Б [3]. В соответствии с руководящим документом [3], к системам данного класса защищенности предъявляются требования по регистрации следующих действий:

- аутентификации пользователей;
- печати документов;
- запуска и завершения программ, процессов, заданий, задач;
- доступа программ и пользователей к защищенным файлам, включая их создание и удаление, передачу по линиям и каналам связи;
- доступа программ и пользователей к терминалам, вычислительным устройствам, узлам сети, каналам связи, подключаемым устройствам, программам, томам, каталогам, файлам, записям, полям записей;
- нарушения целостности защищаемых ресурсов, включая программные средства;
- изменения полномочий субъектов доступа.

Все попытки нарушения защиты должны сигнализироваться на автоматизированном рабочем месте администратора обеспечения безопасности информации (АРМ ОБИ). В ряде случаев, может потребоваться расширение приведенного перечня регистрируемых событий.

В ходе разработки ИКС предлагается создать подсистему информационной безопасности, состоящую из серверной и клиентской части. Серверная часть встраивается телекоммуникационные стойки, образующие сеть комплекса, а клиентская часть представляет собой набор программного обеспечения для АРМ ОБИ и может быть запущена на большинстве типов терминальных устройств, работающих под управлением ОС Astra Linux Special Edition [4].

В данной работе предлагается новый метод управления инцидентами нарушения информационной безопасности ИКС, позволяющий автоматизировать работу администратора ОБИ. Особенностью метода является использование системы сбора событий в качестве основы и минимизация вычислительных ресурсов. Решение предполагается к применению во встраиваемых системах, при условии достаточного знания о работе объекта для составления правил реагирования. Предлагается алгоритм обработки регистрируемых событий и способы реализации функциональных блоков, включая интерфейс взаимодействия с администратором.

## II. ОБЩАЯ СХЕМА ОБРАБОТКИ СООБЩЕНИЙ

Многие технические средства, входящие в состав ИКС, имеют журналы регистрации событий. Далеко не все регистрируемые события относятся к информационной безопасности напрямую, но могут быть использованы в целях выявления несанкционированных действий, например, перезапуск служб или подсистем. К комплек-

су связи предъявляется требование централизованного сбора и хранения различных журналов, что является хорошим источником информации и не требует внедрения дополнительных механизмов.

В соответствии с требованиями по защите информации, в состав системы входят межсетевые экраны, антивирусы, средства аудита, средства централизованного управления пользователями и привилегиями. Дополнительно может использоваться сетевая система обнаружения вторжений.

Имеющиеся в составе комплекса связи механизмы позволяет следовать принципу использования встроенных средств для обнаружения несанкционированных действий. Проблему обработки и отображения большого количества информации предлагается решить следующими способами:

1) Применение модели Kill Chain как основы выстраиваемого графа атаки. Во-первых, соотносить регистрируемые события с имеющимися графиками, что упрощает задачу корреляции. Во-вторых, позволяет визуализировать атаки на временной шкале, при этом минимизировать пропуск события из-за большого количества информации. В-третьих, позволяет выполнять поиск по графу в обратную сторону, в случае если атака не была обнаружена на ранних стадиях. В-четвертых, вершины графа могут использоваться при выборе мер противодействия атакам.

2) Применение исключающих правил на начальных этапах обработки сообщений.

3) Сокращение проходящих через систему сообщений за счет объединения событий из разных источников, свидетельствующих об одном действии.

4) Сокращение проходящих через систему сообщений за счет выделения из них полезной информации. В этих целях применяется набор моделей событий, с которыми должны работать все компоненты подсистемы ИБ.



Рис. 3. Обработка событий информационной безопасности

Функциональная схема системы и порядок обработки событий ИБ представлены на рис. 3.

Источниками сообщений являются различные программные средства различных устройств, образующие множество регистраторов событий. Следует разделять систему архивирования событий (САС) и систему сбора событий ИБ (ССС ИБ). Обе системы выполняют сбор событий без дублирования. Системы целесообразно размещать на одном устройстве, поскольку ССС ИБ использует САС как источник. Поступающие в ССС ИБ сообщения декодируются и нормализуются в соответствии с моделями событий. На этом же этапе применяются

исключающие правила. Далее события попадают в блок пополнения, который объединяет сведения из разных источников для получения полной информации о произошедшей ситуации. Для упрощения и ускорения операции пополнения выполняются по заданным сценариям, зависящим от структуры и состава комплекса. Нормализованные события, соответствующие моделям, направляются в систему реагирования (СР). Блок определения атак сравнивает модели событий с набором показателей, выполняет построения графов атак, формирует базу данных. Далее, программные средства АРМ ОБИ получают из базы данных готовые к построению графы атак и события. Интегрированные в состав АРМ ОБИ программные средства управления позволяют администратору выполнять действия по отражению атаки. Дополнительно присутствует блок контрмер, позволяющий автоматизировать задачу администратора по препятствию несанкционированным действиям.

### III. ДЕКОДИРОВАНИЕ, НОРМАЛИЗАЦИЯ И ИСКЛЮЧЕНИЕ СОБЫТИЙ

От агентов в систему сбора и реагирования поступают сообщения о произошедших событиях с различными форматами и родом информации. Образуемое множество сообщений  $E_i$  будем считать бесконечным (1):

$$E = \{E_1, E_2, \dots, E_i, \dots\}. \quad (1)$$

Информация в сообщениях  $E_i$ , как правило, передается в виде единой текстовой строки без дополнительных параметров. Дальнейшая работа с подобными сообщениями требует проведения синтаксического анализа.

Первичная обработка сообщений строится по следующему принципу: поступающее сообщение декодируется, нормализуется, затем применяются правила реагирования и исключения. Данные правила применяются последовательно, если сообщение не соответствует ни одному правилу, оно отбрасывается.

Процесс декодирования заключается в разделении исходной строки на статические  $St$  и переменные  $Vl$  части в строгом порядке соответствующем правилу декодирования  $Rd$  (2):

$$Rd_j = \{St_1, Vl_1, St_2, Vl_2, \dots, St_j, Vl_k, \dots\}. \quad (2)$$

Правила декодирования  $Rd_j$  применяются по порядку до первого полного совпадения статических частей строки. Если совпадений не найдено, то сообщение будет пропущено. Множеству переменных частей  $\{Vl_k\}$  ставится в соответствие множество параметров, такое что  $Pr_k \rightarrow Vl_k$ . Образованный кортеж  $\langle\{Pr_k\}, \{Vl_k\}\rangle$  является декодированным сообщением. Функцию декодирования  $F_{decode}$  сообщения можно записать в следующем формализованном виде (3):

$$F_{decode}(E_i, \{Rd_j\}) = \langle\{Pr_k\}, \{Vl_k\}\rangle. \quad (3)$$

Как видно из листинга работы OSSEC, декодирование имеет две фазы: предварительное декодирование и декодирование по правилу.

Предварительное декодирование позволяет определить пары  $\{Pr_k\}, \{Vl_k\}$  общие для формата syslog, включая наименование устройства зарегистрировавшего событие и программное средство. Правила предваритель-

ного декодирования находятся в коде программы и применяются всегда. Правила декодирования разрабатываются в зависимости от требований проекта.

Декодирование по правилу позволяет определить пары  $\{Pr_k\}, \{Vl_k\}$  специфичные для программного средства, действия которого были зарегистрированы.

После успешного декодирования сообщения выполняется поиск правила реагирования. Правила реагирования  $Rr$  содержат пары параметр  $Pr_{Rr}$  и его значение  $Vl_{Rr}$ . Соответствием правилу  $Rr_i$  сообщения  $E_i$ , имеющего параметры  $\{Pr_k\}$  и значения  $\{Vl_k\}$ , является выполнение следующего условия (4):

$$\langle\{Pr_{Rr}\}, \{Vl_{Rr}\}\rangle \subseteq \langle\{Pr_k\}, \{Vl_k\}\rangle. \quad (4)$$

Реакция МСОВ на сообщение  $E_i$  является генерация сообщения об успешной аутентификации пользователя с уровнем критичности. Кроме генерации сообщения правило может содержать автоматические действия по блокировке ip-адресов или портов. Сообщение МСОВ включает в себя:

- сообщение  $E_i$  в изначальном виде;
- пары  $\{Pr_k\}, \{Vl_k\}$  полученные в результате декодирования;
- номер сработавшего правила  $Rr_i$ ;
- уровень критичности (Level);
- текст описания события (Description).

Таким образом, функция МСОВ  $F_{ids}$  заключается в преобразовании событий  $E_i$  в виде строки в набор формализованных параметров  $\langle\{Pr_{ids}\}, \{Vl_{ids}\}\rangle$ , который может быть использован для дальнейшей обработки, анализа или визуализации (5).

$$F_{ids}(E_i) = \langle\{Pr_{ids}\}, \{Vl_{ids}\}\rangle. \quad (5)$$

Сообщения МСОВ сохраняются в журнале работы OSSEC, в зависимости от настройки, могут дополнительно отправляться в базу данных или удаленный сервер.

### IV. МОДЕЛИ СОБЫТИЙ

Поскольку минимальной информацией в нормализованном событии является время регистрации, сетевое устройство и программное средство зарегистрировавшее событие, введем следующий общий формат  $E_h$  для описания событий всех типов  $E$ , описываемый следующим кортежем (6):

$$E_h = \langle T, H_{dev}, H_{srv}, M \rangle, \quad (6)$$

где  $T$  – время регистрации события,  $H_{dev}$  – ip адрес или доменное имя сетевого устройства зарегистрировавшее событие,  $H_{srv}$  – служба сетевого устройства зарегистрировавшее событие, в ряде случаев данный параметр может быть именем файла журнала,  $M$  – текст события в начальном виде.

Параметр  $M$  содержит информацию характерную для технического средства, подсистемы, иногда службы или приложения создавших событие. С целью обеспечения автоматизированной обработки все события  $E$  предлагаются разделять на следующие типы:

- 1) сетевые события;
- 2) аутентификация;
- 3) доступ к ресурсам;
- 4) запуска и останова приложений;
- 5) нарушение целостности;
- 6) администрирование;
- 7) подключение устройств;
- 8) неопределенные события.

Регистрируемые события имеют формат, соответствующий своему типу. Требуется создать описание форматов для каждого типа.

Сетевые события  $E_{net} \subset E$  включают попытки доступа к узлам сети, линиям связи, транзитную передачу через сетевые устройства. К примерам событий  $E_{net}$  можно отнести http-запросы пользователей через браузеры к запрещенным ресурсам, обращения с DNS-серверу, срабатывание правил фильтрации МСЭ, регистрируемый СОВ подозрительный трафик, включая P2P. Введем следующий формат для описания событий данного типа (7):

$$E_{net} = \langle E_h, C_{evt}^{net}, S_{dn}, S_{ip}, S_{prt}, D_{dn}, D_{ip}, D_{prt}, P_{net}, S_{srv}, D_{srv} \rangle, \quad (7)$$

где  $C_{evt}^{net}$  – вид сетевого события,  $P_{net}$  – используемый протокол,  $S_{srv}$  – приложение или служба являющаяся отправителем,  $D_{srv}$  – приложение или служба являющаяся отправителем. Установленная информация об отправителе содержит его доменное имя  $S_{dn}$ , ip-адрес  $S_{ip}$  и порт  $S_{prt}$ . Установленная информация об получателе содержит его доменное имя  $D_{dn}$ , ip-адрес  $D_{ip}$  и порт  $D_{prt}$ .

События аутентификации  $E_{auth} \subset E$  включают вход пользователей в систему, выход пользователей из системы, попытки использования заблокированных или несуществующих учетных записей, попытки подбора паролей. Введем следующий формат для описания событий данного типа (8):

$$E_{auth} = \langle E_h, C_{evt}^{auth}, U_{lgn}, R_{ath}, S_{dn}, S_{ip}, S_{prt}, Ap \rangle, \quad (8)$$

где  $C_{evt}^{auth}$  – вид события аутентификации,  $U_{lgn}$  – имя пользователя,  $R_{ath}$  – результат аутентификации,  $Ap$  – приложение или сетевой протокол используемый при аутентификации. В случае, когда аутентификация производится по сети, установленная информация об источнике содержит его доменное имя  $S_{dn}$ , ip-адрес  $S_{ip}$  и порт  $S_{prt}$ .

События доступа к ресурсам  $E_{acc} \subset E$  включают в себя попытки доступа пользователей и программных средств к томам, каталогам, файлам, полям записей. Доступ к ресурсам производится посредством различных операций: чтение, запись, удаление, захват и другие. Введем следующий формат для описания событий данного типа (9):

$$E_{acc} = \langle E_h, C_{evt}^{acc}, U_{lgn}, Ap, As, C_{ast}^{acc} R_{acc} \rangle, \quad (9)$$

где  $C_{evt}^{acc}$  – вид события доступа,  $U_{lgn}$  – имя пользователя под которым произведено обращение к ресурсу  $As$  или запущено приложение обратившегося к ресурсу  $As$ ,  $Ap$  – приложение обратившегося к ресурсу,  $C_{ast}^{acc}$  – уровень важности ресурса,  $R_{acc}$  – результат операции доступа к ресурсу.

События запуска и останова  $E_{stsp} \subset E$  включают в себя выполнение пользователями и программными средствами операций по запуску, останову и перезапуску системных служб, программных процессов, сценариев и командных фалов. Введем следующий формат для описания событий данного типа (10):

$$E_{stsp} = \langle E_h, C_{evt}^{stsp}, U_{lgn}, Ap, C_{app}^{stsp} \rangle, \quad (10)$$

где  $C_{evt}^{stsp}$  – вид события запуска и останова приложений,  $U_{lgn}$  – имя пользователя под которым был выполнен запуск приложения,  $Ap$  – приложение обратившегося к ресурсу,  $C_{app}^{stsp}$  – вид запускаемого приложения (скрипт, программа, приложения для администрирования).

События нарушения целостности  $E_{intg} \subset E$  включают в себя попытки нарушения целостности системы, программной среды, включая средства защиты информации (СЗИ) и специальное программное обеспечение (СПО), защищаемые файлы. К примерам событий  $E_{intg}$  можно отнести несанкционированное изменение конфигурационных файлов, внесение изменения в исполняемый код системы или программных средств. Введем следующий формат для описания событий данного типа (11):

$$E_{intg} = \langle E_h, C_{evt}^{intg}, As, C_{act}^{intg} \rangle, \quad (11)$$

где  $C_{evt}^{intg}$  – вид нарушения целостности,  $As$  – программный компонент или конфигурационный файл целостность которого контролируется,  $C_{act}^{intg}$  – тип действия при нарушении целостности (удаление, изменение, добавление).

События администрирования  $E_{adm} \subset E$  включают регистрацию действий по управлению системой, управление пользователями, включая изменение полномочий пользователей, изменения прав доступа к ресурсам, изменение политик безопасности, конфигурация технических средств, систем и СПО. К примерам событий  $E_{adm}$  можно отнести запуск утилит администрирование домена с последующим созданием новых пользователей, добавлением сервисов и устройств, смена паролей и назначение пользователям прав на администрирование. Введем следующий формат для описания событий данного типа (12):

$$E_{adm} = \langle E_h, C_{evt}^{adm}, U_{lgn}, Dev^{adm}, D_{srv} \rangle, \quad (12)$$

где  $C_{evt}^{adm}$  – вид действия администрирования,  $U_{lgn}$  – имя пользователя под которым произведено действие,  $Dev^{adm}$  – устройство или подсистема,  $D_{srv}$  – сервис.

События подключения устройств  $E_{plg} \subset E$  включают в себя регистрацию подключения и отключения отчуждаемых физических носителей информации, включая внешние диски. В соответствии с руководящими документами [5], должно обеспечиваться сопоставление пользователей с устройствами подлежащее регистрации. Введем следующий формат для описания событий данного типа (13):

$$E_{plg} = \langle E_h, C_{evt}^{plg}, U_{lgn}, Dev^{plg} \rangle, \quad (13)$$

где  $C_{evt}^{plg}$  – тип подключаемого устройства и статус его регистрации,  $U_{lgn}$  – имя пользователя от имени которого смонтировано устройство,  $Dev^{plg}$  – идентификатор подключаемого устройства.

Неопределенными событиями  $E_{unkn}$  считаются такие события  $E$ , которые не соответствуют ни одному из перечисленных выше типов. События  $E_{unkn}$  не могут быть использованы в качестве признаков несанкционированных действий, но сохраняются в архиве для обеспечения возможности получения сведений об активности в сети администратором или автоматизированной системой по ключевым словам.

## V. ПОПОЛНЕНИЕ, АГРЕГАЦИЯ СОБЫТИЙ

Система сбора регистрируемых событий ИБ выполняет обработку поступающих событий, в ходе которой определяется тип, параметры и их значения в соответствии с описанными выше форматами, в случае неопределенного типа событие только архивируется. Возможны случаи, когда регистраторы имеют ограниченную информацию и в результате этого часть параметров в нормализованных событий могут быть пустыми. В этих целях должен быть предусмотрен блок пополнения событий. События сопоставляются по нескольким параметрам: время регистрации, устройство, зарегистрировавшее событие, отдельные параметры событий, такие как имя пользователя, сетевой адрес, порт и другие. В случае, если события  $E_{e_i}$  свидетельствуют об одной и той же активности, такие события могут быть объединены в одно полное событие. Пополнение событий выполняется по сценариям. В общем виде, сценарий пополнения событий выглядит следующим образом (14):

$$E_e = \bigcup E_{e_i}. \quad (14)$$

Приведем пример формирования полного события из событий нескольких регистраторов. Пусть от сетевой СОВ приходит событие  $E_{net}^{IDS}$  о появлении подозрительной активности, при этом только следующие параметры: время, вид трафика, ip адреса, порты получателя и отправителя (15):

$$E_{net}^{IDS} = \langle E_h, C_{evt}, S_{ip}, S_{prt}, D_{ip}, D_{prt}, P_{net} \rangle. \quad (15)$$

Используя данную информацию, в логах DNS сервера можно попробовать найти запросы  $S_{dn}$  и доменные имена  $D_{dn}$ . (16):

$$E_{net}^{DNS} = \langle E_h, S_{dn}, S_{ip}, D_{dn}, D_{ip} \rangle, \quad (16)$$

Так же, используя информацию от СОВ, в журналах протоколирования АРМ можно определить приложение  $S_{srv}$  сгенерированное трафик и протокол взаимодействия  $P_{net}$ .(17):

$$E_{net}^{host} = \langle E_h, S_{ip}, S_{prt}, D_{ip}, D_{prt}, S_{srv} \rangle. \quad (17)$$

Используя средства инспектирования трафика и реестры можно сделать предположение о типе удаленного приложения  $D_{srv}$  и протокол взаимодействия  $P_{net}$ .(18):

$$E_{net}^{fgprt} = \langle E_h, S_{ip}, D_{ip}, D_{prt}, P_{net}, D_{srv} \rangle. \quad (18)$$

Первым в цепочке объединения может быть не только СОВ, но и любой другой регистратор событий. Сценарий пополнения события может быть записан следующим образом (19):

$$E_{net} = E_{net}^{IDS} \cup E_{net}^{DNS} \cup E_{net}^{host} \cup E_{net}^{fgprt}. \quad (19)$$

Сценарии для блоков пополнения событий зависят от применяемых средств разграничения доступа, средств защиты информации и возможностей технических средств комплекса по регистрации событий.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях встраиваемых инфокоммуникационных систем вычислительные мощности оборудования ограничены. Задача обнаружения инцидентов нарушения безопасности требует обработки, анализа и хранения информации по большому количеству инцидентов. Задача осложнена нормативными требованиями, не позволяющими сократить номенклатуру регистрируемых событий. После изучения основных путей выявления несанкционированных действий был разработан новый алгоритм, основанный на работе с цепочкой атак, позволяющий сократить объемы обрабатываемой и выводимой на экран информации. Первым предложенным способом, является перенос всех исключающих правил для ложных срабатываний на начальные шаги алгоритма. Второй способ заключается в преобразовании начальных событий в модели событий, единые для всех функциональных блоков. Учитывая факт регистрации одной группы событий на разных источниках, третий способ обеспечивает объединение нескольких событий в одно полное. Модель цепочки атак Kill Chain была использована в качестве основы для построения графа событий. Предложенные способы анализа позволяют размещать события на графах, исходя из вершин графа выбирать контрмеры для предотвращения атак и использовать построенные графы для визуального представления атак, что существенно структурирует информацию об инцидентах и позволяет автоматизировать работу администратора ОБИ.

Алгоритм описанного метода имеет наборы определенных сценариев и показателей, которые могут меняться в зависимости от объекта и дополняться в случае появления новых видов воздействий. При создании была дополнительно заложена возможность для применения методов машинного обучения в нескольких функциональных блоках.

Предложенный метод планируется использовать в качестве архитектурного решения при проектировании инфокоммуникационных систем и обеспечении их информационной безопасности.

## ЛИТЕРАТУРА

- Информационная система – совокупность содержащейся в базах данных информации и обеспечивающих ее обработку информационных технологий и технических средств. Источник: Федеральный закон от 27.07.2006 N 149-ФЗ (ред. от 28.07.2012) "Об информации, информационных технологиях и о защите информации".
- Руководящий документ ФСТЭК «Базовая модель угроз безопасность персональных данных при обработке в информационных системах персональных данных» (утверждена 15.02.2008 г. заместителем директора ФСТЭК России).
- Руководящий документ Гостехкомиссии России "Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации". – М.: ГТК РФ, 1992. – 20 с.
- Руководство операционной системы специального назначения «Astra Linux Special Edition». – М., 2014.
- Руководящий документ Гостехкомиссии России "Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации". – М.: ГТК РФ, 1992. – 13 с.

# Разработка тестовых стендов киберфизических систем для анализа безопасности

**Басан Елена Сергеевна**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*ebasan@sfedu.ru*

**Прошкин Никита Андреевич**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*nproshkin@sfedu.ru*

**Аннотация.** Объектом исследования являются модели киберфизических систем (КФС). Цель работы – актуализация проблемы информационной безопасности в киберфизических системах, анализ защищенности этих систем, создание сред для тестирования безопасности и выявления новых угроз и уязвимостей. В процессе исследования были разработаны натурные модели киберфизических систем с различными видами связи и используемыми proprietарными протоколами. В результате был проведен поиск уязвимостей и выделен список возможных информационных атак и их последствий, а также были определены возможности отдельных узлов киберфизических систем для создания информационных атак или защиты от них.

**Ключевые слова:** IoT-технологии, информационная безопасность, киберфизические системы, информационные угрозы, информационные уязвимости, Arduino, STM-32, iskra, raspberry pi, киберфизический объект.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Киберфизические системы – это информационно-технологические системы, состоящие из интеграции вычислительных ресурсов в физические сущности, управляемые специальными контроллерами и координируемые интеллектуальным оборудованием [1]. КФС складываются из трех основных типов сетей (рис. 1):

- Человеко-машинных интерфейсов, пользователей – верхнего уровня управления.
- Интернета вещей или сеть киберфизических устройств.

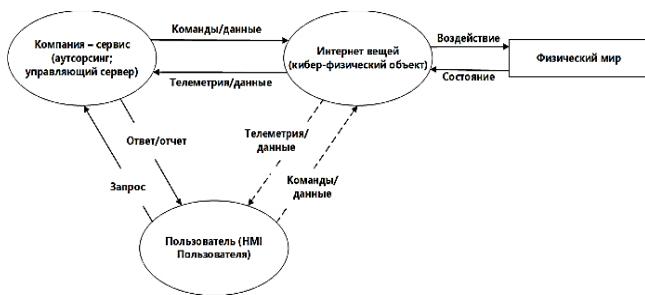


Рис. 1. Структура КФС

При поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации. Стипендия Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (Конкурс СП-2022) № СП-858.2022.5

- Подсистема сервисов.
- Сенсоров, датчиков и других аппаратных средств – физический уровень.

Концепция КФС состоит в управлении киберфизическими объектами.

Киберфизические объекты – это искусственные физические сущности с программно-аппаратным обеспечением, выполняющие различные функции, к ним могут относиться роботы, автоматизированное оборудование и другие устройства, в основе которых лежит взаимодействие с физическим миром через программное и аппаратное оборудование. Такое оборудование полностью соответствует части Интернета вещей связанной с IoT-устройствами, в основе которой лежит управление или взаимодействие с внешней средой посредством специальных датчиков, контроллера и встроенного в него программы. То есть, киберфизические объекты – это те же IoT-устройства [2].

Концептуальная модель КФС состоит из 5 уровней (рис. 2):

- Физический – на котором происходит взаимодействие между киберфизическими устройствами и сбор информации о текущих характеристиках системы.
- Сетевой – на котором происходит взаимодействие между контроллерами киберфизических устройств и управляющими устройствами.
- Хранения данных – на котором происходит передача управляющим устройством информации о текущих характеристиках системы в хранилище.
- Обработки и аналитики – на котором происходит обработка информации о текущих характеристиках системы.
- Приложений – на котором происходит взаимодействие человека с системой и управление характеристиками системы.

Характеристиками системы могут быть:

- Показания различных датчиков.
- Состояние киберфизических объектов.

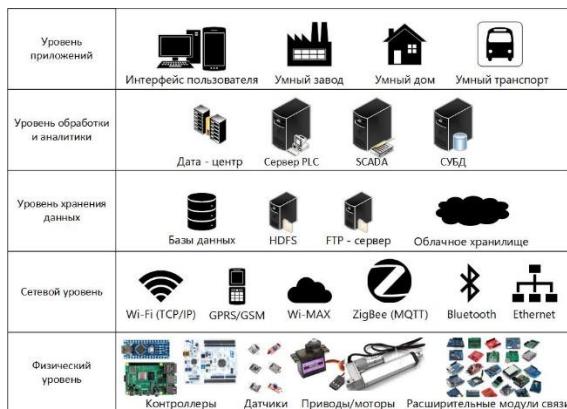


Рис. 2. Концептуальная модель киберфизических систем [3]

С точки зрения информационной безопасности и аудита киберфизические устройства (IoT-устройства), входящие в состав киберфизической системы, должны также выполнять требования руководящих документов и соответствовать стандартам по обеспечению информационной безопасности, тем не менее на сегодняшний день не существует такой нормативно-правовой документации, что ставит под угрозу большинство КФС.

Например, в 2000 году произошел подтвержденный инцидент в Австралии, известный как «атака Маручи». Была установлена комплексная инфраструктура для управления 880 километрами канализационных коллекторов и 142 насосными станциями. Maroochy Water Services имеет централизованную систему управления: из одной точки операторы могут включать и выключать отдельные станции, а также регулировать мощность насосов. Станции можно управлять и на месте, а размещенные на них приборы способны передавать команды, чтобы контролировать работу других станций. Злоумышленник имел доступ к специализированному программному обеспечению, используемому для управления насосами, знал, как подключиться к насосным станциям, и хорошо понимал процедуры, связанные с управлением сточными водами. Основываясь главным образом на доказательствах, найденных в его ноутбуке, он был приговорен к 2 годам тюремного заключения за то, что вызвал выброс 800 000 литров неочищенных сточных вод в парки, общественные водные пути и территорию отеля [4].

Целью моделирования технологического процесса киберфизической системы является предотвращения большинства угроз киберфизической безопасности.

Моделирование и тестирование работы систем можно проводить двумя способами:

1) изолировать информационную среду от программно-аппаратного воздействия на физический мир и проводить тестирование системы в полной работоспособности, анализируя команды управляющих устройств, но без их выполнения киберфизическими объектами – такой способ позволяет уже в реальной системе определять уязвимые места, однако не позволяет исследовать изолированную программно-аппаратную среду в полном объеме без последствий в физическом мире,

2) воссоздать натурную модель системы или отдельных ее компонентов с использованием аналогичных технологий для поддержания технологического процесса, но с

облегченными последствиями эксплуатации уязвимостей – этот способ требует дополнительных затрат на оборудование для тестирования и не дает комплексную оценку безопасности из-за особенностей функционирования реальной системы, однако наглядно и объективно показывает, к чему могут привести уязвимости технологий, используемые в киберфизической системе.

Задачи, которые ставятся перед моделированием и последующего анализа киберфизических систем:

- Анализ информационных и технологических процессов системы: уровни взаимодействия между узлами, передаваемые данные и команды, логика работы, алгоритм и топология системы.
- Составление перечня используемых технологий: ОС управляющих устройств, типы контроллеров, виды датчиков и модулей, виды связи, используемые протоколы, реализуемые системой защиты, роли серверов и т.п.
- Определение нормальной работы системы, которую закладывал разработчик.

## II. АРХИТЕКТУРА КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для упрощения рассмотрения архитектуры КФС и применяемых в них технологий разделим систему на два сегмента:

- Программно-информационный – в котором происходят процессы управления системой и взаимодействия с пользователем.
- Программно-физический – в котором происходит управление киберфизическими объектами и взаимодействие с физическим миром.

Программно-информационный сегмент включает в себя 4 уровня концептуальной модели КФС, представленные на рис. 2: сетевой, хранения данных, обработки и аналитики, приложений. Архитектура программно-информационного сегмента представлена на рис. 3,а. В этом сегменте могут использоваться различные сетевые узлы: маршрутизаторы, коммутаторы. Каждый уровень может представлять из себя отдельно выделенный сервер или обеспечиваться только одним устройством, может осуществляться выход в Интернет или подключение к другим сетям киберфизических систем. По своей сути этот сегмент является Автоматизированной информационной системой, с характерными технологиями, архитектурой, топологиями сетей и т.д.

Программно-физический сегмент включает в себя 2 уровня концептуальной модели КФС, представленные на рис. 2: физический, сетевой. Архитектура программно-физического сегмента представлена на рис. 3,б. В этом сегменте используются технологии «Интернета вещей», робототехники и электроники. Для взаимодействия с физическим миром используются датчики, реле, приводы, транзисторные ключи и т.п. Существует большое количество датчиков, с помощью которых можно определить любое физическое явление, например датчик звука – определяет уровень или просто наличие вибрации, датчик света – объем света в Люменах, датчик температуры, влажности, газа и т.д. – изменение сопротивления резистивного эле-

мента путем воздействия на него окружающей среды. Для управления физическими объектами с помощью электроники создаются специальные механизмы, которые изменяют состояние физического тела посредством программных и аппаратных алгоритмов.

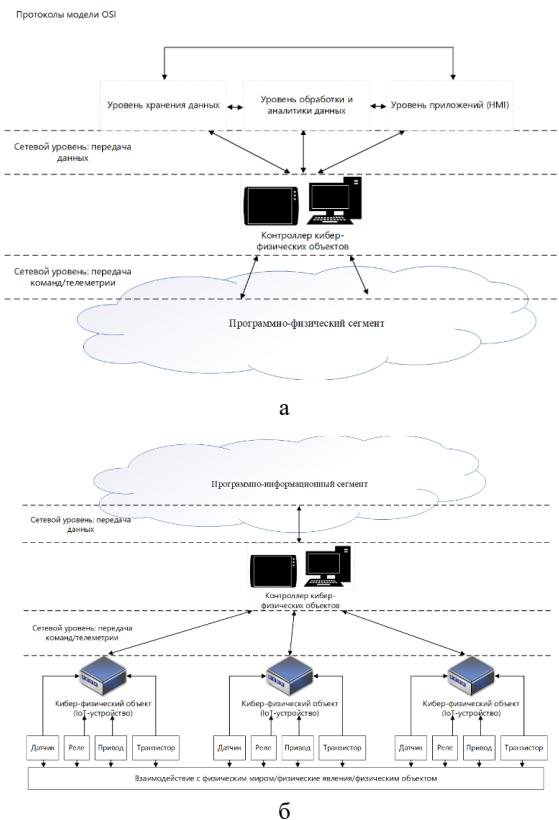


Рис. 3. Архитектура (а) программно-информационного сегмента КФС, (б) программно-физического сегмента КФС

В частности, любую КФС можно рассматривать как систему взаимодействия между киберфизическими устройствами и интерфейсом пользователя в случае, если обработка, хранение информации выполняется на одном узле сети. Связующим звеном между сегментами является контроллер киберфизических устройств, который взаимодействует напрямую или через транзитные контроллеры с различными датчиками, а также взаимодействует с устройствами программно-информационного сегмента посредством проводной или беспроводной связи и с использованием характерных протоколов связи. На рис. 4 представлены виды архитектур сетей киберфизических устройств.

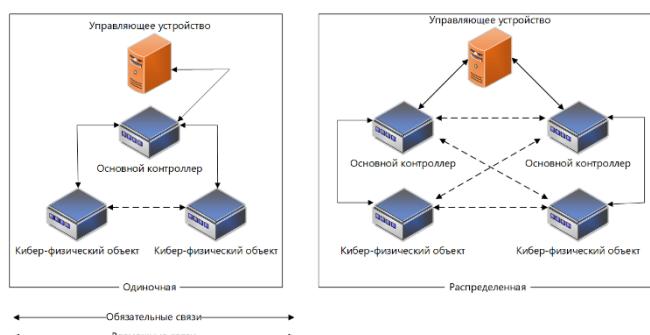


Рис. 4. Архитектуры сетей киберфизических устройств

Одиночная архитектура – когда любой киберфизический объект взаимодействует с управляющим устройством только через один основной контроллер, например в системе «Умный» дом, где основным контроллером является Hub – модем, связывающий сеть датчиков ZigBee и взаимодействует с пользователем по Wi-Fi сети [5]. Распределенная архитектура – когда киберфизические объекты управляются каждый своим основным контроллером, актором («актор – субъект, движимый собственными тактическими мотивами и обладающий для этого соответствующим опытом и «знаниями»» [6]. Причем, каждая архитектура связей не ограничивается передачей данных только между киберфизическими объектом и его контроллером. В зависимости от топологии самой киберфизической системы, возможна передача данных и между киберфизическими объектами, и между контроллерами этих объектов, а также создание резервных путей до киберфизических объектов путем перенаправления канала связи на другой контроллер или актор. В табл. 1 представлены технологии связи и протоколы для взаимодействия устройств внутри программно-физического сегмента и контроллеров с устройствами программно-информационного сегмента.

ТАБЛИЦА 1. ТЕХНОЛОГИИ СВЯЗИ СЕГМЕНТОВ КФС

Сегмент КФС \ Вид связи	Программо-физический (связь между датчиками и контроллерами)	Программно-информационный (связь между контроллерами и управляющими устройствами)
Проводной	UART – протокол (интерфейс) универсальный асинхронной передачи и получения данных [7]. SPI – протокол (интерфейс) последовательной синхронной передачи и получения данных [7]. I2C – протокол (интерфейс) универсальный синхронной передачи и получения данных [7].	USB - последовательный интерфейс для подключения периферийных устройств к вычислительной технике [8]. Ethernet - технология пакетной передачи данных между устройствами для компьютерных и промышленных сетей [9].
Беспроводной	Wi-Fi – стандарты IEEE 802.11 [10]. Bluetooth – стандарты - IEEE 802.15.1 [20]. Открытое радио - возможные частоты: 76 МГц – 2.5 ГГц [10]. RFID – метки – рабочая частота 13 МГц [10]. GSM/GPRS – стандарты мобильной связи [10]. ZigBee – стандарты IEEE 802.15.4 [11]. Z-Wave – стандарт ITU-T G.9959 [12].	Wi-Fi – стандарты IEEE 802.11. Bluetooth – стандарты - IEEE 802.15.1. ZigBee – стандарты IEEE 802.15.4.

### III. СРАВНЕНИЕ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ДРУГИМИ СИСТЕМАМИ

Существует 4 вида обобщенных систем информатизации и управления:

- Информационная система (ИС) – предназначенная для хранения, поиска, обработки, передачи и выдачи информации, например ПК, серверы баз данных, информационные сети и т.д.

- Автоматизированная система (АС) – системы автоматизированного управления какими-либо процессами: технологическими, отраслевыми, информационными, предназначены для автоматизации человеческого труда.
- Автоматизированные информационные системы (АИС) – сочетание ИС и АС, программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий обработку, передачу, хранение информации, автоматизацию процессов системы и деятельности человека.
- Информационно-телекоммуникационная система (ИТКС) – совокупность каналов связи для обмена информацией.

Пятым видом систем стали киберфизические, которые не только включают в себя другие системы, но и интегрируются в физические сущности, при этом влияют на физические объекты посредством внедрения IoT – технологии с учетом характеристик самой системы.

Как говорилось ранее, характеристиками системы могут быть:

- Показания различных датчиков.
- Состояние IoT - устройств.

На рис. 5 представлены сравнительные отличия между различными системами.

Таким образом, киберфизические системы можно отнести к отдельному виду систем, схожими по своей значимости с критическими информационными инфраструктурами из-за возможности их применения в областях КИИ и возможному причинению вреда здоровью людей, экологии, экономике, национальным интересам и обороне страны, а также с АСУ ТП по функциональным возможностям.

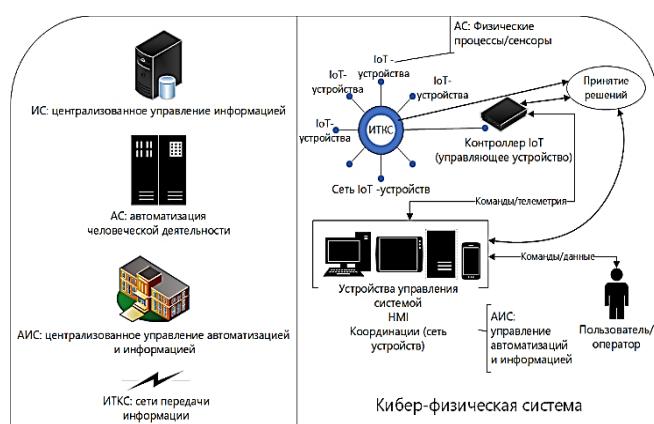


Рис. 5. Различия между КФС и другими системами

КФС может иметь распределенную сеть для управления и взаимодействия компонентов системы, которая включает в себя узлы хранилищ данных физического уровня, узлы аналитики и обработки этих данных, узлы принятия решений и сам интерфейс управления оператора.

#### IV. КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ АТАКИ НА КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

##### A. Случаи взлома КФС

В табл. 2 представлены несколько реальных киберфизических систем с их уязвимостями и потенциальными атаками, реализация которых привела к значительному ущербу.

ТАБЛИЦА 2. КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ АТАКИ НА КФС

Отрасль использования	Наименование КФС	Описание атаки
Медицинское оборудование	Кардиостимулятор Medtronic	Уязвимость кардиостимуляторов с программатором «CareLink 2090», позволяющая злоумышленнику получить удаленный доступ к устройству и контролировать электрические импульсы, посылаемые в сердце, чтобы регулировать сердцебиение пациента [13]
«Умные» автомобили	Автомобиль «Tesla»	Уязвимость мобильного приложения управления автомобилем «Tesla» позволяет злоумышленнику удаленно открывать и блокировать автомобиль, просматривать журнал использования, включать и отключать аксессуары машины, а также получить доступ к другим синхронизированным машинам пользователя [14]
«Умные» средства передвижения	Скутер «Xiaomi Scooter»	Уязвимость программного обеспечения Bluetooth - скутера, позволяющая без аутентификации выполнять любые команды. Злоумышленник может отключить скутер, удаленно загрузить в него вредоносное ПО или изменять скорость движения во время его эксплуатации [15]

В отличие от взлома традиционных информационных систем, где посредством фишинговых атак злоумышленники проникают в системы, проводят разведку и нацелены только на компрометацию конфиденциальности, целостности и доступности информации, подобные атаки на киберфизическими системами стремятся нанести ущерб оборудованию и здоровью людей.

Большинство производителей компонентов киберфизических систем или всей системы в целом не ставят перед собой главной задачей – обеспечение информационной безопасности их продукта.

## B. Уязвимость системы Xiaomi «Умный дом»

Системы «Умный дом» известных производителей состоят из двух технологий беспроводной связи:

- Wi-Fi – для взаимодействия с HMI клиента. Управляющее устройство системы (Hub) подключается к домашней Wi-Fi сети клиента, авторизуется на сервере компании-производителя или на другом облачном сервере для обработки данных. Клиент через приложение с HMI авторизуется на том же сервере и производит управление системой.
- ZigBee – проприetaryный протокол для взаимодействия между управляющим устройством и датчиками.

Преимущества технологии ZigBee:

- Шифрование трафика алгоритмом AES-128 с двумя ключами – сетевым и транспортным для передачи данных, причем, данные шифруются дважды.
- Разворачивание Mesh-сетей.
- Простота масштабирования сети.

В архитектуре протокола ZigBee для шифрования пакетов используются два разных ключа:

- Сетевой ключ – используется для шифрования всего пакета.
- Транспортный ключ – используется для шифрования полезных данных.

Таким образом, для защиты конфиденциальности данных используется двойное шифрование.

Однако, двойное шифрование не обеспечивает защиты, так как значение транспортного ключа шифруется сетевым ключом, а при его компрометации полезные данные можно будет расшифровать.

Уязвимость протокола ZigBee продемонстрирована на рис. 6 и заключается в том, что после получения сетевого ключа, например, методом полного перебора, наименование полей протокола станут доступными для чтения, что позволит легко определить значение транспортного ключа и расшифровать полезные данные.



Рис. 6. Пример уязвимости протокола ZigBee открытого и закрытого текстов

Из рис. 6 видно, что после расшифрования сетевым ключом, наименование поля «APS: Command» изменится на «Transport Key». На подбор ключа методом полного перебора уйдет очень много времени и ресурсов, однако, производители назначают каждому Hub-устройству сетевого ключ по умолчанию, который есть в открытом доступе. Отсюда следует, что злоумышленнику не придется тратить время на подбор сетевого ключа.

Для того, чтобы вести мониторинг сети ZigBee, был применен метод анализа сети Wi-Fi. Для этого необходимо использовать сетевую карту, которая переводится в режим «Монитор» и принимает весь трафик, который проходит по этой сети. У ZigBee в качестве сетевой карты может использоваться «стик» CC2531, прошитый на перехват протоколов. Также необходимо ПО, которое облегчает анализ трафика. Таким образом, оборудование, которое необходимо для проведения снiffинга и анализа трафика, представлено в следующем списке:

- «Стики» ZigBee cc2531 (рис. 7).
- CC-Debugger для прошивки (рис. 8).
- Прошивка «стиков» в качестве перехватчика пакетов.
- Аналитор пакетов Wireshark.
- Утилита работы с перехватчиком ZigBee и трансляции пакетов в Wireshark «TiWsPc» (рис. 9).
- Декодер зашифрованных данных, встроенный в Wireshark.



Рис. 7. USB адаптер CC2531 ZigBee



Рис. 8. Устройства для прошивания ZigBee «стиков» CC Debugger



Рис. 9. ПО взаимодействия со «стиком» и транслирования пакетов в Wireshark

В Wireshark есть встроенный декодер пакетов, поэтому нужно лишь в его параметрах указать алгоритм и значения ключей шифрования. После добавления сетевого ключа в конфигурацию Wireshark, пакет протокола ZigBee будет расшифрован. Таким образом, в системе с устройствами, работающими по протоколу ZigBee, возможны атаки типа FDI – инъекция ложных данных, путем создания собственного пакета протокола ZigBee.

**C. Уязвимости натурной модели «Умный нефтяной насос»**

Натурная модель является аналогом системы удаленного управления «Агрегатами электро-насосные нефтяные магистральные серии АНМ7500» [16]. Агрегаты являются автоматизированными, управляющиеся удаленно оператором. Они используются не только в нефтедобывающей промышленности, но также в промышленности водоснабжения и др. Для некоторых систем используется веб-приложение для удаленного управления и мониторинга, в натурной модели управление реализовано по протоколу HTTP. Умный нефтяной насос» состоит из микроконтроллера Arduino UNO, сетевой карты Ethernet, драйвера моторов, тактового двигателя, сервопривода и дымогенератора. Управляется по протоколу передачи данных HTTP [17]. Оператор, подключенный к системе, может управлять скоростью двигателя и отслеживать его мощность. При превышении допустимой мощности происходит имитация возгорания мотора.

Принцип управления системой: Ethernet-карта подключается к маршрутизатору через кабель, микроконтроллер является сервером, который отображает пользовательский интерфейс на веб-странице. Оператор, подключенный к маршрутизатору через устройства управления (ПК или телефон), находится в одной сети LAN (WLAN) с системой. Интерфейс управления состоит из кнопок включения, отключения, увеличения и понижения скорости двигателя и показателя его мощности. Обновление веб-страницы и считывания полученных команд микроконтроллером происходит раз 1 секунду. Внешний вид модели представлен на рис. 10.

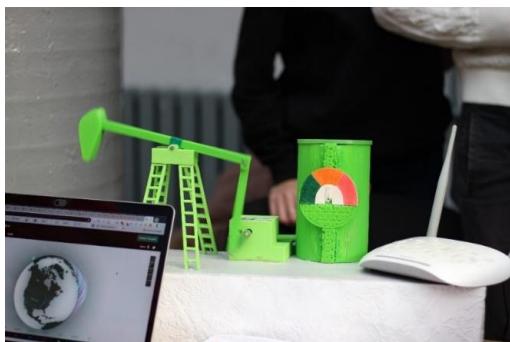


Рис. 10. Внешний вид «Умного нефтяного насоса»

Управление системой, подключенной к маршрутизатору через кабельный кросс, производится устройствами управления (ПК или телефон), находящимися в одной сети WLAN (LAN) с микроконтроллером Arduino UNO, по протоколу HTTP, с помощью подключения к интерфейсу управления и поддержки системы через адресную строку браузера (в адресной строке указывается IP-адрес Ethernet Shield'a – 192.168.0.105, и переход на страницу управления). Обобщенный алгоритм взаимодействия с системой:

- Пользователь удаленного рабочего стола производит подключение к маршрутизатору.
- Пользователь удаленного рабочего стола производит подключение к Arduino UNO по протоколу HTTP.

- В зависимости от потребностей нажимает на гиперссылку, которая является определенной командой для Arduino UNO.
- Установка конкретных значений переменных.
- Анализ полученных результатов после взаимодействия с системой.
- Пользователь удаленного рабочего стола производит завершение сеанса подключения к удаленному рабочему столу.

Мощность двигателя изменяется ШИМ-сигналом, где значения ШИМ 255 = 100 %; 0 = 0 %. Условное ограничение на мощность двигателя насоса выбрано 80%.

При превышении этого значения включается генератор дыма, имитируя выход из строя двигателя насоса.

В табл. 3 представлены некоторые выявленные уязвимости компонентов системы, потенциальные угрозы и сценарии возможных атак на систему «Умный нефтяной насос». Данные уязвимости являются наиболее характерными для этого стенда. Для данного стенда характерных также другие уязвимости протокол связи, незащищённость протоколов стека TCP/IP.

ТАБЛИЦА 3. Уязвимости, потенциальные угрозы и возможные атаки на систему

Уязвимость	Угроза	Сценарий атаки
Уязвимость реализации протокола HTTP позволяющая злоумышленнику считывать конфиденциальную информацию.	Угроза перехвата данных, заключается в отсутствии криптографических алгоритмов защиты информации и в возможности злоумышленника ознакомления с передаваемыми полезными данными, а вследствие их подделывания и внедрения в канал связи.	Для перехвата данных и их анализ злоумышленник может воспользоваться анализатором трафика «Wireshark» и перевести свою сетевую карту в режим «Монитора». В дальнейшем, зная структуру полезных данных, подделать пакет, например, инструментом «Scapy».
Уязвимость микропрограммного обеспечения модуля Ethernet системы, вызванная переполнением буфера на стеке, позволяющая нарушителю вызвать отказ в обслуживании.	Угроза потери соединения оператора с системой заключается в возможности злоумышленника вызова отказа в обслуживании сетевой карты системы.	Модуль Ethernet выступает в роли сетевой карты модели и веб-сервера, который уязвим к переполнению входящих запросов. Злоумышленник может воспользоваться утилитой генерации пакетов «HPING» для вызова отказа в обслуживании сетевой карты. А при продолжительных DoS (DDoS) – атаках вывести из строя аппаратное обеспечение сетевой карты.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Информационная и физическая защита киберфизических систем не должна ограничиваться требованиями и рекомендациями предъявляемые к устройствам высоких уровней, необходимы разработки методических и нормативно-правовых документов в отношении устройств, составляющих киберфизическкие объекты.

Агентство сетевой и информационной безопасности Европоюза (ENISA) в 2018 году проводили аудит киберфизических устройств и технологии «Интернета вещей» и выявили несколько основных сценариев кибератак на них [18]:

- Атака на соединение между контроллерами и киберфизическими объектами – злоумышленник внедряет и запускает вредоносный код в системе, манипулируя данными, которые передаются между контроллером и станком.
- Атаки на микроконтроллеры датчиков – взломав контроллер, злоумышленник может изменить его прошивку или конфигурацию, а затем изменять данные, которые он передаёт управляющему устройству.
- Атаки на акторы киберфизических объектов (подавление их состояния, изменение конфигурации).
- FDI-атаки – навязывание ложных данных, передаваемых по сети.
- Атаки на маршрутизаторы, к которым подключены киберфизические объекты.
- Атаки на устройства удалённого управления, HMI (панели оператора, смартфоны).
- Вредоносное ПО, распространяющееся по сети: для проникновения оно использует уязвимости в прошивках и операционных системах,
- DDoS-атаки с эксплуатацией киберфизических объектов.

Также они сформулировали меры безопасности для киберфизических устройств.

Четвёртая промышленная революция принесёт не только новые возможности, но и новые риски. Подсчитывая экономию от внедрения полностью автоматизированных предприятий, нужно обязательно учитывать расходы на кибербезопасность [19]. Уязвимость всего одного киберфизического устройства может стать источником проблем для целой киберфизической системы. В условиях, когда таких устройств даже не сотни, а десятки и сотни тысяч, задача их защиты превращается в стратегическую.

Таким образом, моделирование киберфизических систем и выявление уязвимостей на моделях является важной задачей. В данном исследовании были продемонстрированы только несколько уязвимостей и небольшое количество стендов. Тем не менее уже понятно, как злоумышленник может проникнуть в систему и нанести ей ущерб. Разработанные стенды максимально приближены к реальным стендам [20, 21]. Для формирования представления о киберфизических системах и способах их функционирования был проведен теоретический анализ и анализ существующих киберфизических систем, а также атак на них.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кибер-физические системы – URL: <https://www.tadviser.ru/a/374827> (дата обращения 12.04.2022).
2. Что такое IoT-устройства? – URL: <https://iotconf.ru/ru/article/chto-takoe-iot-ustroystva-korotko-o-glavnom-91029> (дата обращения 12.04.2022).
3. Смышляева А.А., Резникова К.М., Савченко Д.В. Современные технологии в Индустрии 4.0 – кибер-физические системы // Отходы и ресурсы. – 2020. – Т. 7, № 3. – С. 2-12.
4. Басан Е.С., Пескова О.Ю., Михайлова В.Д., Шулика М.Г. Разработка методики анализа угроз и уязвимостей БПЛА // Информационные системы и технологии в моделировании и управлении: Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции, Ялта, 24-26 мая 2021 года / Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Гуманитарно-педагогическая академия (филиал). – Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство Типография "Ариал", 2021. – С. 235-239.
5. Как сделать свой дом интеллектуальным с устройствами ZigBee от Xiaomi. – URL: <https://security-club.ru/articles/kak-sdelat-svoj-dom-intellektualnym-s-ustrojstvami-zigbee-ot-xiaomi> (дата обращения: 15.04.2022).
6. Зaborовский В., Лукашин А., Мулюха В. Платформа управления кибер-физическими объектами // Открытые системы. СУБД. – 2013. – № 8 (31). – С. 163-176.
7. Модули связи. Интерфейсы Arduino. – URL: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/interfaces/> (дата обращения 20.04.2022).
8. Полежаев П.Н., Малахов А.К., Сагитов А.М. "Ахиллесова пятка" USB-устройств: атака и защита // Философские проблемы информационных технологий и киберпространства. – 2015. – № 1 (9). – С. 106-117.
9. Протокол Ethernet. – URL: <https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Ethernet> (дата обращения 20.04.2022).
10. Модули связи. Беспроводная связь Arduino. – URL: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/interfaces/> (дата обращения 20.04.2022).
11. Умный дом на базе ZigBee. – URL: <https://rusmarta.ru/support/utplnuy-dom-na-baze-zigbee/> (дата обращения 20.04.2022).
12. Бурдуковский В.Н. Медицинские кибер-физические системы // Стратегии и инструменты управления экономикой: отраслевой и региональный аспект: Материалы IX Международной научно-практической конференции / под общей редакцией В.Л. Васильёвка. – СПб: Национальный исследовательский университет ИТМО, 2021. – С. 5-9.
13. Прошкин Н.А., Басан Е.С. Актуализация проблем информационной безопасности в ИОТ-инфраструктурах // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении "КомТех-2020": Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в 2 т. – Ростов-на Дону, Таганрог, 02-05 июня 2020 года. - Ростов-на Дону, Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – С. 35-39.
14. Уязвимость мобильного приложения Tesla. – URL: <https://habr.com/ru/news/t/645445/> (дата обращения 29.04.2022).
15. Proshkin N.A., Basan E.S., Lapina M.A. et al. Developing models of IoT infrastructures to identify vulnerabilities and analyse threats // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 1, Stavropol, 28-29 мая 2020 года. – Stavropol, 2020. – P. 012018. – DOI: 10.1088/1757-899X/873/1/012018.
16. Магистральные нефтяные электронасосы агрегаты. – URL: <https://turbonasos.ru/en/?mcat=7&rec=94419406> (дата обращения 03.05.2022).
17. Обзор протокола HTTP. – URL: <https://developer.mozilla.org/ru/docs/Web/HTTP/Overview> (дата обращения: 03.05.2022).
18. Good practices for security of internet of things in the context of smart manufacturing. – URL: <https://www.enisa.europa.eu/publications/good-practices-for-security-of-iot> (дата обращения 15.05.2022).
19. Ashibani Y., & Mahmoud Q.H. Cyber physical systems security: Analysis, challenges and solutions // Computers & Security. – 2017. – 68. – P. 81-97. – DOI: 10.1016/j.cose.2017.04.005.
20. Hahn A., Ashok A., Sridhar S., & Govindarasu M. Cyber-Physical Security Testbeds: Architecture, Application, and Evaluation for Smart Grid // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2013. – 4 (2). – P. 847-855. – DOI: 10.1109/tsg.2012.2226919.
21. Poudel S., Ni Z., & Malla N. Real-time cyber physical system testbed for power system security and control // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2017. – 90. – P. 124-133. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.01.016.

# Защита изображений на основе преобразования Мёбиуса на конечных гауссовых полях

Мнухин Валерий Борисович

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*vbmnuhin@sfedu.ru*

**Аннотация.** В работе предлагается новый метод криптографической защиты цифровых изображений, используемых в медицине. Он основан на применении преобразования Мёбиуса над конечными полями целых чисел Гаусса, являющимися конечными аналогами поля комплексных чисел. Метод использует только модулярную арифметику, что исключает ошибки округления и гарантирует абсолютную точность восстановленного изображения. Экспериментальные исследования на основе разработанного комплекса программ подтвердили работоспособность и эффективность предложенного метода.

**Abstract.** In this paper, we introduce a new method for encryption of medical images. The technique is based on the Möbius transform over finite fields of Gaussian integers, which may be considered as finite analogues of the field of complex numbers. Application of such technique requires modular arithmetic only, thus guaranteeing a strictly lossless image encryption. The execution and image analysis reveals that the proposed technique attains good encryption results and has efficient potential in image encryption applications.

**Ключевые слова:** криптография, защита цифровых изображений, конечные поля, перестановочные многочлены, скремблинг, преобразование Мёбиуса, целые Гаусса.

**Keywords:** cryptography, digital images encryption, finite fields, permutation polynomials, scrambling, Möbius transformation, gaussian integers.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Криптографическая защита информации является основой современного «цифрового» общества. В настоящее время известен и активно используется ряд крипtosистем, (как симметричных, так и с открытым ключом), большинство из которых так или иначе опирается на использование конечных полей (RSA, эллиптическая криптография, и проч.) Вместе с тем, оптимальный выбор метода защиты предполагает соблюдение баланса между стойкостью и практичностью используемого алгоритма. Например, абсолютно стойкий шифр Вернама [1] использует ключ той же длины, что и открытый текст, что резко ограничивает возможности его практического применения.

Таким образом, возникает вопрос об оптимальных методах защиты цифровых изображений. Особенностью изображений является, с одной стороны, их больший объем, а с другой – сниженные, в ряде случаев, требова-

ния к криптостойкости. В частности, криптозащита медицинских данных, (например, рентгенограмм), часто не требует той же стойкости, что и защита банковской информации.

В данной работе предлагается новый эффективный метод защиты цифровых изображений, основанный на их представлении функциями на конечных полях Гаусса, с последующим скремблингом на основе обобщенного преобразования Мёбиуса. Метод ориентирован на защиту медицинских данных и является дальнейшим развитием метода *гауссовых вращений* [2, 3].

Работа имеет следующую структуру. В разделе 2 приводится краткий обзор известных на текущий момент методов защиты изображений, ориентированных на использование конечных полей. В следующих разделах 3 и 4 вводятся понятия конечного поля Гаусса и цифрового изображения на таком поле. В разделе 5 кратко описываются некоторые известные результаты, относящиеся к перестановочным многочленам. Затем в разделе 6 эти результаты используются для определения нового биективного преобразования конечных гауссовых полей. Описанию предлагаемого метода защиты цифровых изображений посвящен раздел 7, где также рассматриваются некоторые детали его практической реализации.

## II. ОБЗОР МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Современная медицина активно использует цифровые изображения для представления разнообразных данных (например, результатов компьютерной томографии, МРТ, ультразвукового сканирования, и проч.). Характерными особенностями таких данных являются, в частности, их двухмерность, а также большой объём. При этом весьма актуальной становится обеспечение защиты подобных данных, предполагающей, в частности, выполнение требований *конфиденциальности* (доступности данных только авторизованным лицам) и *целостности* (невозможности изменения посторонними лицами). Вместе с тем, требования к стойкости криптозащиты медицинских данных в ряде случаев ниже чем, например, к стойкости банковской информации. Это делает целесообразным разработку специальных методов их защиты. Действительно, в настоящее время широко используются [4, 5] такие криптографические методы как протоколы на основе системы RSA, эллипти-

ческая криптография и ряд других методов, гарантирующих весьма высокую степень защищенности. Однако, поскольку RSA-подобные протоколы оперируют в настоящее время с информационными блоками относительно небольшой длины (порядка 2048 бит), кодирование даже небольшого цифрового изображения с помощью таких протоколов требует обработки десятков тысяч блоков, что в ряде случаев оказывается нецелесообразным. Поэтому для защиты медицинских данных часто используют классический метод скремблинга, заключающийся в перестановке пикселей и/или значений функции яркости изображения, причем подобная перестановка может происходить как в пространственной, так и в частотной областях [6].

В настоящее время для криптозащиты цифровых изображений предлагается использовать такие методы как хаотические последовательности [6], случайное преобразование фазы Фурье-образа изображения [7, 8], преобразование Арнольда [9], дробное преобразование Меллина [10], а также ряд других методов [11]. В то же время, любое преобразование медицинских данных обязано удовлетворять ультимативному требованию *достоверности* – расшифрованное изображение должно абсолютно точно соответствовать оригиналу, поскольку расхождение даже в единственном пикселе может повлиять на правильность диагноза [12]. Выполнения этого условия возможно при проведении вычислений в конечных полях, когда отсутствие ошибок округления гарантирует точность преобразований. В частности, для достоверной защиты медицинских данных предлагается использовать такие преобразования над конечными полями, как косинус-преобразование Фурье [13–15], дробное преобразование Фурье [16], и ряд других.

Требованию достоверности удовлетворяют также методы, основанные на использовании перестановочных многочленов над конечными полями. Начиная с середины прошлого века, такие многочлены интенсивно изучались и использовались в криптографии [17, 18], а проблема их полной классификации остается открытой до сих пор [19–22]. В частности, в [23, 24] перестановочные многочлены предлагается использовать для защиты изображений.

Ранее в работах [2, 3] был предложен метод защиты изображений, основанный на так называемых гауссовых вращениях. В данной работе рассматривается дальнейшее развитие этого метода, основанное на использовании преобразования Мёбиуса в конечных полях Гаусса. Сохраняя простоту и эффективность метода гауссовых вращений, предлагаемый подход обладает значительно более высокой криптостойкостью, и, насколько можно судить по доступной литературе, является новым.

### III. КОНЕЧНЫЕ ПОЛЯ ГАУССА

Будем обозначать через  $\mathbb{Z}$  и  $\mathbb{C}$  кольцо целых чисел и поле комплексных чисел соответственно. Кольцо классов вычетов по модулю целого  $n > 1$  условимся обозначать как  $\mathbb{Z}_m = \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ , а конечное поле из  $p^m$  элементов – как  $\mathbb{GF}(p^m)$ , где число  $p$  простое, а  $m > 0$  – целое. Напомним, что в теории чисел [25, 26] *гауссовыми целыми* называются комплексные числа вида  $a + ib$ , где  $a, b \in \mathbb{Z}$ . Множество  $\mathbb{Z}[i]$  таких чисел замкнуто относительно сложения и умножения, но деление в  $\mathbb{Z}[i]$ , вооб-

ще говоря, не определено. Заметим, что элементы  $\mathbb{Z}[i]$  образуют квадратную решетку на комплексной плоскости  $\mathbb{C}$ . Естественная идея сопоставлять пикселям цифрового изображения гауссовые целые, рассматривая операции в кольце  $\mathbb{Z}[i]$  как преобразования изображений, известна, по крайней мере, с 1993 года [27]. К сожалению, отсутствие деления в  $\mathbb{Z}[i]$  существенно ограничивает применимость такого подхода, в силу чего он не получил широкого распространения.

Развитием предыдущего метода является замена кольца  $\mathbb{Z}[i]$  целых Гаусса на конечное поле, обладающее свойствами, аналогичными, в некотором смысле, свойствам поля  $\mathbb{C}$ . Возможность построения таких полей основана на том, что, если для какого-нибудь целого  $k > 0$  число  $p = 4k + 3$  оказывается простым, то многочлен  $x^2 + 1$  будет неприводимым над полем  $\mathbb{Z}_p$  [25]. Пользуясь методом расширения полей [26], приходим к следующему определению.

**Определение 1.** Пусть целое число  $p \geq 3$  – простое и такое, что  $p \equiv 3 \pmod{4}$ . Тогда конечное поле

$$\mathbb{C}(p) = \frac{\mathbb{Z}_p[x]}{(x^2+1)} \cong \mathbb{GF}(p^2) \quad (1)$$

называется *полям Гаусса* или *гауссовым полем*.

Вспоминая, что поле  $\mathbb{C} \cong \mathbb{R}[x]/(x^2 + 1)$  можно рассматривать как квадратичное расширение кольца многочленов над  $\mathbb{R}$ , можно заметить определенную аналогию между  $\mathbb{C}$  и  $\mathbb{C}(p)$ . С учётом этого, условимся далее там, где не может возникнуть недопонимания, обозначать элементы поля  $\mathbb{C}(p)$  так же, как и комплексные числа, то есть писать  $z = a + ib \in \mathbb{C}(p)$ , понимая под  $a, b \in \mathbb{Z}_p$  классы вычетов по модулю  $p$  с соответствующими целыми представителями, а под  $i$  – класс вычетов  $x$  по модулю идеала  $(x^2 + 1)$ . Будем называть  $z \in \mathbb{C}(p)$  *дискретными комплексными числами*, и использовать при работе с ними стандартную терминологию комплексного анализа.

В гауссовых полях естественно вводятся [13, 28] аналоги экспоненциальной, логарифмической, и тригонометрических функций, понятия аргумента и показательной формы, преобразования Фурье и Меллина, а также ряд других понятий. В частности, это позволило предложить в [29] метод распознавания на цифровых изображениях объектов, обладающих симметрией четвертого порядка. Развивая аналогию между  $\mathbb{C}$  и  $\mathbb{C}(p)$ , в разделе 6 над гауссовыми полями будет определено преобразование Мёбиуса, называемое в комплексном анализе также *дробно-линейным преобразованием*.

### IV. ЦИФРОВЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ПОЛЯХ ГАУССА

Под *цифровым изображением* на поле  $\mathbb{C}(p)$  условимся понимать всякую функцию  $f(z): \mathbb{C}(p) \rightarrow \mathbb{R}^+$ , определенную на элементах  $z = a + ib$  этого поля и принимающую неотрицательные значения; дискретное комплексное число  $z \in \mathbb{C}(p)$  назовём *пикселием* изображения, а целые  $a, b \in [0, p - 1]$  – *координатами* этого пикселя. Тем самым, изображения на  $\mathbb{C}(p)$  предполагаются однотонными и имеют размер  $p \times p$ , где  $p = 3 \pmod{4}$ , например,  $p = 127, 251, 503, 1019$ . Отметим, что не ограничивает применимости метода, что поскольку всякое изображение можно вложить в квадрат-

ное большего размера, а обработку цветных изображений вести по слойно. Удобно представлять изображения на  $\mathbb{C}(p)$  как совокупность квадратных пикселей на дискретном торе  $\mathbb{Z}_p \times \mathbb{Z}_p$ .

Заметим, что операции поля  $\mathbb{C}(p)$  порождают преобразования изображений. В частности, операции сложения отвечает циклический сдвиг. Действительно, рассмотрим преобразование  $T_w: f(z) \rightarrow f(z + w)$ , где  $w = x + iy \in \mathbb{C}(p)$ . Результат преобразования  $T_w[f]$  представляет собой исходное изображение  $f(z)$ , сдвинутое циклически на  $x$  единиц вдоль «действительной» оси, и на  $y$  единиц вдоль «мнимой» оси. Будем называть  $T_w[f]$  *сдвигом* изображения  $f(z)$  на  $w$ . Как очевидно,  $T_{-w} = T_w^{-1}$ ; тем самым, сдвиги обратимы и являются перестановками пикселей исходного изображения.

Более интересным оказывается преобразование  $R_w: f(z) \rightarrow f(wz)$ . Как известно, на непрерывной комплексной плоскости  $\mathbb{C}$  вращения сводятся к умножению на числа с модулем, равным единице. Можно предположить, что и преобразование  $R_w$  должно быть, в некотором смысле, аналогичным вращению. Как показано в [2], такие *гауссовые вращения* на  $\mathbb{C}(p)$  действительно напоминают непрерывные вращения. Точнее говоря, при определенных условиях изображение  $R_w[f]$  на торе  $\mathbb{Z}_p \times \mathbb{Z}_p$  будет состоять из нескольких уменьшенных и повернутых копий исходного изображения  $f$ ; нарушение же этих условий ведет к значительным искажениям оригинала. В то же время гауссовые вращения обратимы,  $R_{w^{-1}} = R_w^{-1}$ , и тоже являются перестановками пикселей. С учётом этого, в [2,3] было предложено использовать гауссовые вращения для защиты изображений путём создания защитных сеток и текстур. Несмотря на простоту и эффективность, очевидным недостатком такого метода является его малая криптостойкость. Действительно, гауссовые вращения определяются единственным параметром  $w \in \mathbb{C}(p)$ , и, следовательно, вероятность случайного подбора этого параметра не меньше  $p^{-2}$ , что вряд ли можно считаться удовлетворительным. С целью улучшения степени защищённости, далее будет рассмотрен новый класс преобразований, переставляющих элементы конечных гауссовых полей. Их определение опирается на понятие перестановочных многочленов, рассматриваемых в следующем разделе.

## V. ПЕРЕСТАНОВОЧНЫЕ МНОГОЧЛЕНЫ

Пусть  $\mathbb{F}_q = \text{GF}(p^m)$ , (где  $q = p^m$ ), будет произвольным конечным полем, не обязательно гауссовым. Рассмотрим кольцо многочленов  $\mathbb{F}_q[x]$ .

**Определение 2.** Многочлен  $g(x) \in \mathbb{F}_q[x]$  называется *перестановочным* над полем  $\mathbb{F}_q$ , если отображение  $g: c \rightarrow g(c)$ , где  $c \in \mathbb{F}_q$ , является биекцией, или, другими словами, является перестановкой элементов поля  $\mathbb{F}_q$ .

Например, несложно проверить, что многочлен  $x^5 + 2x^2$  является перестановочным над  $\mathbb{F}_7$ , а многочлен  $x^5 + x$  — над полем  $\mathbb{F}_9$ . Естественно возникает вопрос: не могут ли два различных многочлена порождать одну и ту же перестановку. Ответ на него дает следующая лемма [20].

**Лемма 1.** Если  $g, h \in \mathbb{F}_q[x]$ , то  $g(c) = h(c)$  для всех  $c \in \mathbb{F}_q$  тогда и только тогда, когда

$$g(x) \equiv h(x) \pmod{x^q - x}. \quad (2)$$

Более того, если число  $d > 1$  делит  $q - 1$ , то над полем  $\mathbb{F}_q$  не существует перестановочного многочлена степени  $d$ . Таким образом, степень такого многочлена не превосходит  $q - 1$ .

Начиная с середины прошлого века, широкое использование [17, 19] перестановочных многочленов в криптографии является стимулом для их интенсивного изучения. Заметим, что, формально, построение таких многочленов несложно: достаточно выбрать одну из  $q!$  перестановок элементов поля  $\mathbb{F}_q$  в качестве значений конструируемого многочлена, после чего использовать интерполяционную формулу Лагранжа. Таким образом, каждая перестановка элементов из  $\mathbb{F}_q$  реализуется некоторым многочленом. Поэтому интерес представляется только построение перестановочных многочленов специального, (желательно, простого) вида, обеспечивающего быстроту вычислений, а также поиск условий, гарантирующих перестановочность.

Заметим, что новые перестановочные многочлены можно строить из уже известных с помощью операции *композиции*: если  $g(x)$  и  $h(x)$  — два произвольных перестановочных многочлена над  $\mathbb{F}_q$ , то многочлен

$$r(x) = g(h(x)) \pmod{x^q - x} \quad (3)$$

также будет перестановочным над тем же полем. Тем самым, множество всех перестановочных многочленов поля  $\mathbb{F}_q$ , имеющих степень, меньшую чем  $q$ , образует относительно операции композиции группу, изоморфную симметрической группе  $S_q$ . Несложно найти [19, 20] образующие этой группы.

**Лемма 2.** Многочлены  $g(x) = ax + b$ ,  $a, b \in \mathbb{F}_q$ ,  $a \neq 0$ , и  $h(x) = x^d$ ,  $\gcd(d, q - 1) = 1$ , являются перестановочными над всяkim полем  $\mathbb{F}_q$  и порождают группу всех перестановочных многочленов этого поля.

В частности, перестановочными над  $\mathbb{F}_q$  будут

$$g(h(x)) = ax^d + b \text{ и } h(g(x)) = (ax + b)^d. \quad (4)$$

В следующем разделе мы расширим класс биективных отображений на  $\mathbb{C}(p)$  дробно-линейными преобразованиями.

## VI. ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МЁБИУСА

Аналогия между конечным полем  $\mathbb{C}(p)$  и непрерывным комплексным полем  $\mathbb{C}$  позволяет ввести на  $\mathbb{C}(p)$  новый класс биективных отображений. Напомним хорошо известное в комплексном анализе определение [30] *преобразования Мёбиуса* или *дробно-линейного преобразования*. В отличие от обычной функции комплексного переменного на поле  $\mathbb{C}$ , преобразование Мёбиуса  $M(z)$  определяется на расширенной комплексной плоскости  $\hat{\mathbb{C}} = \mathbb{C} \cup \{\infty\}$ , получаемой из  $\mathbb{C}$  формальным добавлением дополнительной точки, обозначаемой  $\infty$ ; такая *компактификация* позволяет рассматривать  $\hat{\mathbb{C}}$  как сферу Римана. Преобразование Мёбиуса  $M_A(z): \hat{\mathbb{C}} \rightarrow \hat{\mathbb{C}}$  зависит от четырёх параметров  $a, b, c, d \in \mathbb{C}$ , формирующих невырожденную  $2 \times 2$ -матрицу

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, \quad ad - bc \neq 0, \quad (5)$$

и при  $c \neq 0$  задается выражением

$$M_A(z) = \begin{cases} \frac{az+b}{cz+d}, & z \neq -d/c \\ \infty, & z = -d/c \\ a/c, & z = \infty \end{cases} \quad (6)$$

(Заметим, что случай  $c = 0$  сводится к композиции гауссова вращения  $R_{a/d}$  и сдвига  $T_{b/d}$ , и поэтому не будет здесь рассматриваться.) Легко проверить, что преобразование Мёбиуса обратимо: если  $w = M_A(z)$ , то

$$M_A^{-1}(w) = \begin{cases} \frac{-dw+b}{cw-a}, & w \neq a/c \\ \infty, & w = a/c \\ -d/c, & w = \infty \end{cases} \quad (7)$$

Тем самым,  $M_A(z)$  является биективным отображением на  $\widehat{\mathbb{C}}$ , причём на «специальных» точках  $a/c$  и  $-d/c$  оно действует следующим образом:

$$M_A(z): -d/c \rightarrow \infty \rightarrow a/c. \quad (8)$$

Как несложно видеть, каждая композиция преобразований Мёбиуса снова является преобразованием Мёбиуса:

$$M_A(M_B) = M_{AB}. \quad (9)$$

Как очевидно, если считать параметры  $a, b, c$ , и  $d$  лежащими в  $\mathbb{C}(p)$ , то преобразование Мёбиуса непосредственно переносится на расширенные конечные поля Гаусса  $\widehat{\mathbb{C}(p)} = \mathbb{C}(p) \cup \{\infty\}$ , где под  $\infty$  понимается формально добавленный к  $\mathbb{C}(p)$  элемент (его удобно считать дополнительным пикселим-сферой, лежащим внутри дискретного тора  $\mathbb{Z}_p \times \mathbb{Z}_p$ ). Более того, с помощью  $M_A(z)$  можно строить новые биективные отображения на  $\widehat{\mathbb{C}(p)}$ . Действительно, пусть  $g(x)$  – произвольный перестановочный многочлен над  $\mathbb{C}(p)$ . Продолжим его на  $\widehat{\mathbb{C}(p)}$ , полагая  $g(\infty) = \infty$ . Понятно, что композиция  $M_A(g(z)) : \widehat{\mathbb{C}(p)} \rightarrow \widehat{\mathbb{C}(p)}$  будет биекцией. (Отметим, что в непрерывном случае единственным перестановочным многочленом является  $g(x) = ax + b$ , что делает предыдущее утверждение в этом случае тривиальным.) В данной работе мы ограничимся рассмотрением только частного случая такой композиции.

**Определение 3.** Пусть  $\mathbb{C}(p)$  – конечное поле Гаусса, а  $M_A(z)$  – преобразование Мёбиуса на  $\widehat{\mathbb{C}(p)}$ . Пусть  $k$  – целое число, являющееся взаимно-простым с  $p^2 - 1$ , т.е.,  $\gcd(k, p^2 - 1) = 1$ . Преобразование  $M_A^{(k)} : \widehat{\mathbb{C}(p)} \rightarrow \widehat{\mathbb{C}(p)}$  такое, что

$$M_A^{(k)}(z) = M_A(z^k), \quad (10)$$

будем называть *степенным преобразованием Мёбиуса* над  $\mathbb{C}(p)$ . В развернутом виде  $M_A^{(k)}(z)$  и обратное к нему преобразование записываются следующим образом:

$$M_A^{(k)}(z) = \begin{cases} \frac{az^k+b}{cz^k+d}, & z \neq \sqrt[k]{-d/c} \\ \infty, & z = \sqrt[k]{-d/c} \\ a/c, & z = \infty \end{cases}, \quad (11)$$

$$\left(M_A^k(w)\right)^{-1} = \begin{cases} \sqrt[k]{\frac{-dw+b}{cw-a}}, & w \neq a/c \\ \infty, & w = a/c \\ \sqrt[k]{-d/c}, & w = \infty \end{cases}. \quad (12)$$

Из Леммы 2 следует биективность  $M_A^{(k)}(z)$  на  $\widehat{\mathbb{C}(p)}$ . Заметим, что на «специальных» элементах  $a/c$  и  $\sqrt[k]{-d/c}$  оно действует следующим образом:

$$M_A^{(k)}(z) : \sqrt[k]{-d/c} \rightarrow \infty \rightarrow a/c. \quad (13)$$

В следующем разделе мы применим степенные преобразования Мёбиуса для защиты изображений.

## VII. ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА ЗАЩИТЫ

Для простоты будем считать изображения однотонными размера  $n \times n$  (отметим, что цветные RGB-изображения можно обрабатывать послойно). Такое цифровое изображение полностью определяется своей функцией яркости  $\Phi(x, y)$ , заданной в точках целочисленной сетки  $[0, \dots, n-1] \times [0, \dots, n-1]$ , где пара  $(x, y)$  задает координаты некоторого пикселя изображения. Условимся считать изображения восьми-битовыми; тогда  $\Phi$  принимает значения из интервала  $I = [0, \dots, 2^8 - 1]$ .

На первом этапе кодирования выберем простое число  $p \geq n$  такое, что  $p \equiv 3 \pmod{4}$ , и определим на  $\mathbb{C}(p)$  функцию  $f(z) : \mathbb{C}(p) \rightarrow I$  как  $f(x + iy) = \Phi(x, y)$  при  $0 \leq x, y \leq n-1$ , и  $f(x + iy) = 0$  при  $n \leq x, y \leq p-1$ . Как очевидно,  $f(z)$  полностью определяет исходное изображение.

На следующем этапе выберем произвольную невырожденную матрицу  $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$  с элементами из поля  $\mathbb{C}(p)$ , причём такую, что  $c \neq 0$ . Затем выберем число  $k$  так, чтобы оно было взаимно-просто с  $p^2 - 1$ , т.е., чтобы  $\gcd(k, p^2 - 1) = 1$ . Параметры  $A$  и  $k$  определяют некоторое степенное преобразование Мёбиуса  $M_A^{(k)}(z)$ . Ключом предлагаемой симметричной криптосистемы является тройка  $\langle p, A, k \rangle$ . Таким образом, ключ имеет длину порядка 96 бит.

Кодировка изображения сводится к перестановке его пикселей с помощью преобразования  $M_A^{(k)}(z)$ . Ранее оно определялось на расширенном поле  $\widehat{\mathbb{C}(p)} = \mathbb{C}(p) \cup \{\infty\}$ . Однако, поскольку значение яркости на пикселе  $\infty$  можно задавать произвольно, перестановку можно произвести «на месте», без выделения память под дополнительный пиксель  $\infty$ . Для этого определим функцию  $F(w) : \mathbb{C}(p) \rightarrow I$  следующим образом:

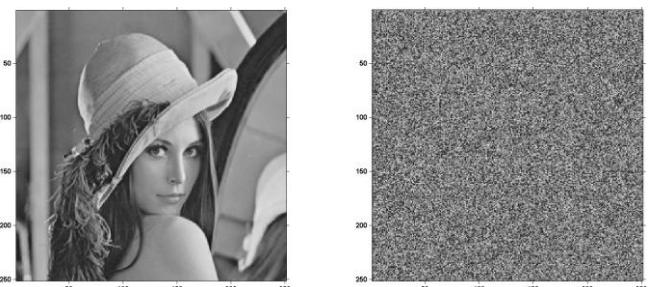


Рис. 1. Пример защищённого изображения

$$\begin{cases} F(M_A^{(k)}(z)) = f(z), \text{ если } z \neq \sqrt[k]{-d/c}, \\ F(a/c) = f(\sqrt[k]{-d/c}). \end{cases} \quad (14)$$

Результатом кодирования будем считать изображение на поле  $\mathbb{C}(p)$  с функцией яркости  $F(w)$ . На рис. 1 показано, как выглядит закодированное изображение размера  $251 \times 251$  (малый размер изображения был выбран в целях наглядности).

Дешифровка изображения  $F$  проводится в обратном порядке. Поскольку ключ предполагается известным, то вначале находятся позиции  $a/c$  и  $\sqrt[k]{-d/c}$  «специальных» пикселей, и значение  $F(a/c)$  запоминается. Затем производится перестановка пикселей закодированного изображения с помощью обратного степенного преобразования Мёбиуса, после чего пикслю с позицией  $\sqrt[k]{-d/c}$  присваивается значение  $F(a/c)$ .

Для оценки криптостойкости предлагаемой системы защиты, найдём количество её возможных ключей, полагая значение  $p$  фиксированным. Вспоминая [31] определения и свойства полной линейной  $GL_2(\mathbb{F}_q)$  и треугольной  $T_2(\mathbb{F}_q)$  групп над конечным полем  $\mathbb{F}_q$  из  $q = p^2$  элементов, заметим, что количество матриц  $A \in GL_2(\mathbb{C}(p))$ , соответствующих преобразованиям Мёбиуса, равно

$$|GL_2(\mathbb{F}_q)| - |T_2(\mathbb{F}_q)| = (q^2 - 1)(q^2 - q) - q(q - 1)^2 \sim q^4 = p^8. \quad (15)$$

Как очевидно, число различных значений параметра  $k$  равно  $\varphi(p^2 - 1)$ , где  $\varphi(n)$  – функция Эйлера. Поскольку при  $n > 6$  выполняется [32] неравенство

$$\varphi(n) \geq \sqrt{n}, \quad (16)$$

получаем, что существует, по крайней мере,  $\sqrt{p^2 - 1} \sim p$  различных значений  $k$ . Таким образом, число возможных ключей можно оценить как  $p^9$ , что даже для сравнительно небольшого изображения размера  $3000 \times 3000$  превышает  $10^{31}$ .

Особенностью предлагаемого метода является сохранение неизменной гистограммы изображения: действительно, количество пикселей одной и той же яркости при перестановке не изменяется. В зависимости от специфики решаемой задачи защиты, это может рассматриваться либо как достоинство, либо как недостаток метода. С одной стороны, неизменность гистограмм позволяет использовать их для индексации и быстрого поиска в базе защищённых данных. С другой, нельзя исключить возможности подмены защищённого изображения на иное с искусственно подогнанной гистограммой. Возникающая проблема является общей для всех методов защиты, использующих перестановки пикселей. Для её решения, как правило, множество значений функции яркости заменяется на большее множество, в котором одному и тому же значению яркости соответствует несколько элементов [23], после чего элементы этого множества случайным образом переставляются, см. [24]. Являясь стандартным, этот же приём может быть использован вместе с предлагаемым методом.

В заключение заметим, что эффективность метода непосредственно связана с возможностью быстрого нахождения степеней и корней элементов в поле  $\mathbb{C}(p)$ . На практике это достигается путём использования предвычисленной таблицы дискретных логарифмов. Несмотря на отсутствие в настоящее время быстрого способа вычисления значений дискретных логарифмов, относительно небольшие размеры практически значимых полей  $\mathbb{C}(p)$  позволяют создавать такие таблицы за приемлемое время.

### VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы. В работе рассмотрен метод защиты цифровых изображений, гарантирующий абсолютную точность восстановления оригинала, что позволяет использовать его для защиты медицинских данных. Новизна метода связана с использованием не рассматривавшегося ранее степенного преобразования Мёбиуса над конечными полями. Приведен алгоритм кодирования изображения и рассмотрены условия и ограничения его применимости. Приведен пример работы алгоритма.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Vaudenay S. A classical introduction to modern cryptography: Applications for Communications Security. – Springer, 2006. – 335 p. – ISBN: 0-387-25880-9.
2. Каркищенко А.Н., Мнухин В.Б. Применение гауссовых вращений для защиты графической информации // Машинное обучение и анализ данных. – 2017. – Т. 3, № 1. – С. 61-75 – DOI: 10.21469/22233792.3.1.05.
3. Мнухин В.Б. Методы защиты графической информации на основе конечных полей Гаусса и Эйзенштейна // Современные проблемы прикладной математики и информационных технологий: материалы междунаучно-практич. конф. (Бухара, Узбекистан, 11-12 мая 2022 г.) / Бухарский гос. ун-т. – Бухара: Изд-во БухГУ, 2022. – С. 470-471.
4. Яценко, В.В. Введение в криптографию. – М.: МЦНМО, 1999. – 272 с. – ISBN 5-900916-40-5.
5. Stalling W. Cryptography and network security: principles and practice. – 6<sup>th</sup> ed. – New Jersey: Pearson Education Inc, 2014. – 681 p. – ISBN: 978-93-325-1877-3.
6. Ye G. Image scrambling encryption algorithm of pixel bit based on chaos map // Pattern Recognition Letters. – 2010. – Vol. 31, No. 5. – P. 347-354. – DOI: 10.1016/j.patrec.2009.11.008.
7. Liu Z., Xu L., Dai J., Liu S. Image encryption by using local random phase encoding in fractional Fourier transform domains // Optik. – 2012. – Vol. 123, No. 5. – P. 428-432. – DOI: 10.1016/j.jleo.2011.04.022.
8. Liu Z., Yang M., Liu W., Li S., Gong M., Liu S. Image encryption algorithm based on the random local phase encoding in gyrator transform domains // Optics Communications. – 2012. – Vol. 285, No. 19. – P. 3921-3925. – DOI: 10.1016/j.optcom.2012.05.061.
9. Sui L., Gao B. Color image encryption based on gyrator transform and Arnold transform // Optics & Laser Technology. – 2013. – Vol. 48. – P. 530-538.
10. Zhou N., Wang Y., Gong L., Chen X., Yang Y. Novel color image encryption algorithm based on the reality preserving fractional Mellin transform // Optics and Laser Technology. – 2012. – Vol. 44, No. 7. – P. 2270-2281. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2012.02.027.
11. Kumar M., Lahcen R.A., Mohapatra R.N., Alwala C., Kurella S.V. Review of Image Encryption Techniques // IOSR Journal of Computer Engineering. – 2020. – Vol. 22, No. 1. – P. 31-37. – DOI: 10.9790/0661-2201013137.
12. Magdy M., Hosny K.M., Ghali N.I., Ghoniemy S. Security of medical images for telemedicine: a systematic review // Multimedia Tools and Applications. – Springer, 2022. – DOI: 10.1007/s11042-022-11956-7.
13. Lima J.B., Lima E.A.O., Madeiro F. Image encryption based on the finite field cosine transform // Signal Processing: Image Communication. – 2013. – Vol. 28, No. 10. – P. 1537-1547. – DOI: 10.1016/j.image.2013.05.008.

14. Lima J.B., Lima E.A.O., Madeiro F. Encryption of medical images based on the cosine number transform // Signal Processing: Image Communication. – 2015. – Vol. 35, No. 2. – P. 235–248. – DOI: 10.1016/j.image.2015.03.005.
15. Kumar S., Panna B., Jha R.K. Medical image encryption using fractional discrete cosine transform with chaotic function // Med. Biol. Eng. Comput. – 2019. – Vol. 57. – P. 2517–2533. – DOI: 10.1007/s11517-019-02037-3.
16. Lima J.B., Novaes L.F.G. Image encryption based on the fractional Fourier transform over finite fields // Signal Processing. – 2014. – Vol. 94. – P. 521-530.
17. Laigle-Chauv Y. Permutation polynomials and applications to coding theory // Finite Fields and Their Applications. – 2007. – Vol. 13. – P. 207-213.
18. Wang L. On permutation polynomials // Finite Fields and Their Applications. – 2002. – Vol. 8. – P. 311–322. – DOI: 10.1006/ffa.2001.0342.
19. Mullen G.L., Panario D. Handbook of Finite Fields // Taylor & Francis, Boca Raton. – 2013. – 1010 p. – ISBN: 978-1-4398-7382-3.
20. Лудл Р., Нидеррайтер Г. Конечные поля. – М.: Мир, 1988. – 822 с. – ISBN 5-03-000066-6.
21. Xiang-dong H. Permutation polynomials over finite fields: A survey of recent advances // Finite Fields and Their Applications. – 2015. – Vol. 32. – P. 82-119. – DOI 10.1016/j.ffa.2014.10.001.
22. Li N., Helleseth T., Tang X. Further results on a class of permutation polynomials over finite fields // Finite Fields and Their Applications. – 2013. – Vol. 22. – P. 16-23. – DOI: 10.1016/j.ffa.2013.02.004.
23. Wu J., Liu H., Zhu X. Image encryption based on permutation polynomials over finite fields // Optica Applicata – 2020. – Vol. 50, No. 3. – P. 357-376. – DOI: 10.37190/oa200303.
24. Wagh N.B., Kolhekar M. A novel approach utilizing permutation polynomials over integer rings as a cryptological application for effective encryption of digital images // International Journal of Computer Sciences and Engineering. – 2017. – Vol. 5, No. 1. – P.14-21.
25. Айзнеренб K., Роузен М. Классическое введение в современную теорию чисел. – М: Мир, 1987. – 416 с.
26. Terres A. Fourier analysis on finite groups and applications. – Cambridge University Press, 1999. – 453 p. – ISBN 0-521-45718-1.
27. Baker H. Complex gaussian integers for gaussian graphics // ACM Sigplan Notices. – 1993. – Vol. 28, No. 11. – P. 22-27.
28. Mnukhin V.B. Fourier–Mellin transform on a complex discrete torus // 11th Conference (International) “Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies” Proceedings. – Samara, 2013. – P. 102-105. – DOI: 10.13140/RG.2.1.4366.4086.
29. Karkishchenko A.N., Mnukhin V.B. Fourfold symmetry detection in digital images based on finite Gaussian fields // Adv. Intell. Syst. – 2016. – Vol. 451. – P. 153–162. – DOI: 10.1007/978-3-319-33816-3\_16.
30. Brown J.W., Churchill R.V. Complex Variables and Applications. – McGraw-Hill, 2009. – 468 p. – ISBN: 978-0-07-305194-9
31. Артнин Э. Геометрическая алгебра. – М.: Наука, 1969. – 283 с.
32. Sándor J., Mitrinović D.S., Crstici B. Handbook of Number Theory I – Springer, 2006. – 637 p. – ISBN: 1-4020-3658-2.

# Концепция базы знаний угроз киберфизических систем на основе онтологического подхода

**Басан Александр Сергеевич**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*abasan@sfedu.ru*

**Корчаловский Сергей Витальевич**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*korchalovsky@sfedu*

**Басан Елена Сергеевна**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*ebasan@sfedu.ru*

**Михайлова Василиса Дмитриевна**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*vmihaylova@sfedu.ru*

**Иванникова Татьяна Николаевна**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*tivannikova@sfedu.ru*

**Шулика Мария Геннадьевна**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*mshulika@sfedu.ru*

**Аннотация.** В связи с бурным развитием киберфизических систем возникает всё больше проблем с безопасностью. Цель данной работы – разработка концепции базы знаний в области безопасности киберфизических систем на основе онтологического подхода. Для создания концепции базы знаний было необходимо рассмотреть систему киберфизической системы и выделить ее структурные части. В результате были выделены основные концепты безопасности киберфизической системы и составлена концепция базы знаний, которые в дальнейшем помогут провести анализ потенциальных угроз киберфизических систем.

**Ключевые слова:** киберфизическкая система, Интернет вещей, угроза, безопасность, онтология.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В связи с бурным развитием киберфизических систем (КФС) возникает всё больше проблем с безопасностью. Речь идёт не только о кибербезопасности, но и о безопасности жизни человека. Для того, чтобы предупредить и устраниТЬ угрозы, вызванные КФС, необходимо накапливать знания о киберфизических системах. В последствии эти знания станут основой для построения концепта безопасности КФС.

КФС представляет собой взаимосвязь физических и программных компонентов, которые влияют на производственный процесс или управление технологическим объектом. Это и отличает их от типовых информационных систем. Ввиду этого возникает проблема в обеспечении безопасности КФС, так как традиционных подходов обеспечения безопасности будет недостаточно для решения проблем безопасности КФС. Для решения данной проблемы возникает необходимость создания полномасштабной базы знаний в области безопасности КФС, где будут накапливаться, систематизироваться и представляться в определенном формате знания о таких системах.

При поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации. Стипендия Президента Российской Федерации молодым учёным и аспирантам (Конкурс СП-2022) № СП-858.2022.5.

Для представления концепта безопасности киберфизической системы её необходимо покомпонентно описать, а также выявить все актуальные для неё угрозы и уязвимости. Описание каждого компонента с точки зрения безопасности, а также взаимосвязи этих компонентов, поможет оценить всю систему в целом. Поиск актуальных угроз и уязвимостей киберфизических систем нужен для того, чтобы представить карту угроз системы и на её основе предвидеть последствия угроз и составить необходимые контрмеры. Поэтому поиск актуальных угроз и уязвимостей – одна из основных задач составления базы знаний безопасности КФС.

## II. АНАЛИЗ РАБОТ

Онтологический инжиниринг давно стал предметом исследований. Авторы статьи [1] изучили систему знаний сети о планировании производства стали и создали базу знаний о смешанных процессах производства стали и метод инкапсуляции знаний.

В статье [2] авторами с помощью теории о системе знаний и технологий модульной онтологии с множественной гранулярностью были формально описаны элементы энергопотребления. Также авторы предложили модель энергопотребления сети знаний для дискретных производственных систем.

Интеллектуальная система анализа угроз и оценки рисков нарушения кибербезопасности энергетических объектов была разработана авторами статьи [3] с помощью применения онтологического инжиниринга. Также в статье приводятся результаты построения онтологий основ кибербезопасности.

Исходя из анализа рассмотренных работ можно сделать вывод, что проектирование и разработка онтологий помимо глубокого анализа предметной области дает возможность совместной обработки знаний на основе одного семантического описания области знаний.

### III. КИБЕРФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Киберфизическая система – это система, в которой механизм управляется или контролируется компьютерными алгоритмами. В КФС физические и программные компоненты тесно переплетены, способны работать в разных пространственных и временных масштабах, демонстрируют множественные и разные поведенческие модальности и взаимодействуют друг с другом способами, которые меняются в зависимости от контекста [4].

Концепция КФС варьируется от массивных до минимальных систем. Более того, эта концепция по своей сути является междисциплинарной и мультитехнологичной и актуальной в самых разных областях с многочисленными социально-техническими последствиями. На рис. 1 приведена структура КФС.



Рис. 1. Структура киберфизической системы

В общем, КФС имеет под своим контролем физический процесс, набор датчиков, которые сообщают о состоянии процесса контроллеру, который, в свою очередь, посылает управляющие сигналы исполнительным механизмам для поддержания системы в желаемом состоянии. Контроллер обменивается данными с системой, которая отвечает за конфигурацию КФС. Таким образом физическая часть системы собирает данные, а киберфизическая – обрабатывает. Взаимодействие между подсистемами представлено на рис. 2.

КФС широко применяется в таких секторах мировой экономики, как промышленность, транспорт, энергетика и здравоохранение, а также во многих других. Основными целями КФС являются управление вычислительной системой с обратной связью за счет комбинации технологий ЗС: вычислительные, коммуникационные и управляющие технологии [4].

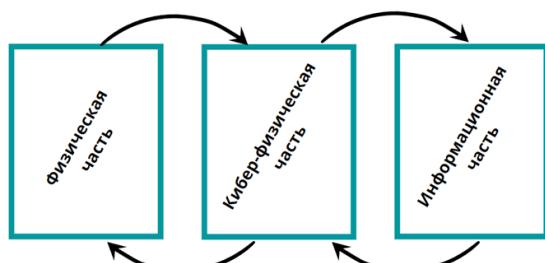


Рис. 2. Взаимодействие между подсистемами

### IV. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

После анализа структуры и архитектуры КФС можно выделить концепты КФС с точки зрения безопасности. Концепт – это базовое понятие данной предметной области. Между концептами строятся связи, которые определяют соотношение и взаимодействие базовых понятий [5].

С точки зрения безопасности КФС состоит из объектов защиты, которые в свою очередь содержат структурно-функциональные характеристики (СФХ). СФХ представляют собой совокупность подсистем, обеспечивающих функционирование системы.

СФХ имеют свои недостатки безопасности, которые заключаются в наличии уязвимостей того или иного компонента системы. Уязвимости используются для реализации угрозы злоумышленником при выполнении атаки. Угрозы приводят к рискам безопасности КФС, которые влекут за собой ущерб. Таким образом получаются следующие концепты безопасности КФС: объект, СФХ, угроза, уязвимость, атака, риск. На рис. 3 представлены выделенные концепты безопасности киберфизических систем.

Связи между концептами основываются на самих определениях.

Риск информационной безопасности – это потенциальная возможность использования уязвимостей активов конкретной угрозой для причинения ущерба организации [6].

Угроза информационной безопасности – это совокупность условий и факторов, создающих потенциальную или реально существующую опасность нарушения безопасности информации [7].

Объект защиты информации – это информация или носитель информации, или информационный процесс, которые необходимо защищать в соответствии с поставленной целью защиты информации [8].

Структурно-функциональные характеристики – это функциональные и обеспечивающие функционирование подсистемы [9].

Уязвимость – это недостаток программно-технического средства или информационной системы в целом, который может быть использован для реализации угроз безопасности информации [8].

Атака – это совокупность действий нарушителя, направленная на реализацию угрозы информационной безопасности. Всякая атака основана на наличии в ИС уязвимостей, и «правильное» использование хотя бы одной из них открывает злоумышленнику вход в систему [10].

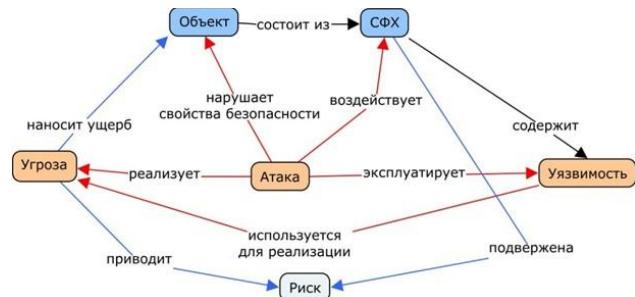


Рис. 3. Концепты безопасности киберфизических систем

## V. ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ

Чтобы представить знания об угрозах информационной безопасности в виде иерархической структуры, в данном исследовании применяется онтологический инжиниринг. Онтология – это структурная спецификация некоторой предметной области, ее формализованное представление, которое включает словарь (или имена) указателей на термины предметной области и логические выражения, которые описывают, как они соотносятся друг с другом [11].

Ядром базы знаний является описанная выше концептуальная модель, которая включает в себя «объект», «СФХ», «угрозу», «уязвимость», «атаку» и «риск». Концепт «угроза» является центральным в модели, потому что угроза – это объект оценки в данной работе.

Онтология, представленная на рис. 4, имеет многоуровневую структуру. На первом уровне располагается угроза, выделенная оранжевым цветом, на втором – концепты безопасности, которые имеют разные цвета, на третьем – характеристики концептов, окрашенные голубым цветом, и наконец – оценочные уровни, окрашенные коричневым цветом. Оценочные уровни могут принимать значения критичный, высокий, средний и низкий, исходя из характеристик объекта и смоделированных компонентов атаки, уязвимости и риска.

Концепты безопасности КФС помогают оценить систему с точки зрения безопасности. Характеристики концептов дают их конкретизацию, подробное описание. Оценочные уровни уже дают оценку концептам в зависимости от их характеристик.

Угроза воздействует на объект, который характеризуется областью функционирования (домен) и технологиями, которые определяют его функционал (характеристики). Объект имеет уровень критичности, который показывает значимость сферы функционирования объекта и насколько объект сможет функционировать без своих характеристик.

Угроза также воздействует на СФХ, из которых состоит объект. СФХ имеет свои типы, которые определяются на основе функционала этой характеристики. Для СФХ определены уровень критичности, который показывает значимость, важность этой СФХ для объекта, и уровень дестабилизации, который показывает подверженность СФХ угрозам.

Угроза эксплуатируется атакой, которая характеризуется тем, кто ее реализует (нарушитель), что она может нарушить (цель), последовательностью действий (сценарий) и что может произойти в результате реализации этой последовательности (последствия). Нарушитель имеет уровень потенциала, который представляет собой совокупность имеющихся возможностей и мотивов. Атака имеет уровень влияния, который показывает возможные последствия после ее реализации.

Угроза вызвана уязвимостью, которую может проэксплуатировать атака для реализации угрозы. Уязвимость имеет типовую структуру, включающую тип, который определяет причину атаки, и класс, который определяет место ее возникновения. Воздействие уязвимости на СФХ и объект в целом отражается степенью опасности.

И наконец риски. Риски влекут за собой ущерб. Ущерб – это последствия, возникшие в результате реализации угрозы. Ущерб также имеет уровень критичности, который определяет последствия для объекта.

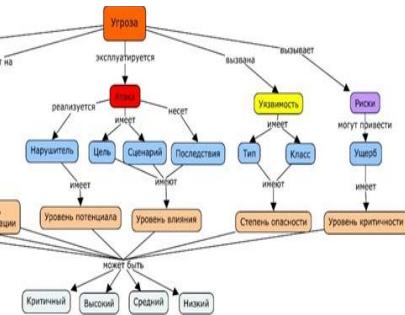


Рис. 4. Онтология угроз безопасности киберфизических систем

Для каждого концепта построена наиболее подходящая модель представления знаний. Каждая модель основывается на структуре КФС, российских и зарубежных работах по теме информационной безопасности КФС. Далее рассмотрим эти модели более детально.

Одним из концептов является объект. Объект – это совокупность систем и сетей, информационных ресурсов и средств обработки информации, алгоритмов и технологий работы систем, которая реализована в какой-то определенной области (медицина, Интернет вещей, промышленность и т. д.). Объект имеет домен и характеристики. На рис. 5 они выделены желтым цветом. Домены были выделены исходя из того, где могут применяться КФС. Также в число доменов входят объекты критической информационной инфраструктуры. Характеристики – это те технологии, которые используют объект для выполнения своих задач. Они определяют функционал СФХ. Характеристики были определены исходя из того, насколько они могут повлиять на начальную защищенность объекта. Характеристики помогают уточнить, какой тип системы рассматривается. Компоненты выделенных характеристик объекта (домена и характеристик) на рисунке выделены розовым цветом.

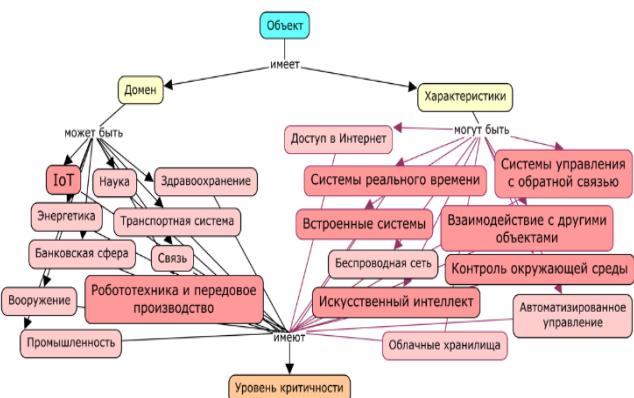


Рис. 5. Онтология объекта

Объект состоит из СФХ, которые обеспечивают функционирование системы. СФХ делятся исходя из их типов. Тип определяется на основе их функционала. Так аппаратное обеспечение с помощью технических

средств обеспечивает функционирование системы. Микропрограммное обеспечение позволяет управлять устройствам и системой в целом. Сетевое обеспечение организует работу пользователей и объектов информатизации в сети. Программные средства отвечают за выполнение аппаратными средствами своих функций в соответствии с определенным для них алгоритмом. Интеллектуальная система позволяет автоматизировать задачи, которые должен выполнять человек. Система безопасности с помощью совокупности организационных, физических и программных мер организовывает защиту систему и снижает риски возникновения угроз безопасности. На рис. 6 типы выделены желтым цветом.

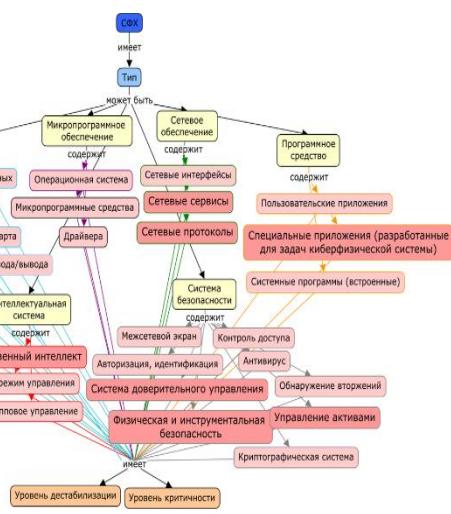


Рис. 6. Онтология СФХ

Розовым цветом выделены подтипы типов. Как раз таки подтипы представляются собой компоненты, из которых может состоять КФС. Каждый тип СФХ может повлиять на защищенность системы, потому что компоненты, включенные в эти типы, могут иметь свои недостатки в безопасности, которые в совокупности вызывают угрозу безопасности КФС.

Угроза реализуется атакой, которая может произойти в любой точке архитектуры КФС. В данной работе вектор атаки включает в себя нарушителя, цель атаки, сценарий атаки и последствия реализации атаки. На рис. 7 эти компоненты выделены голубым цветом.

Атака имеет цель. В данном случае в качестве цели рассматривается нарушение свойств безопасности, потому что конфиденциальность, целостность и доступность являются одними из характеристик системы и их нарушение может привести к дестабилизации работы системы. Свойства безопасности выделены розовым цветом.

Атака реализуется по определенному сценарию, который имеет свои характеристики – характер воздействия и инструментарий. На рисунке они выделены желтым цветом. По характеру воздействия атака может быть активной и пассивной. Активная атака предполагает ее прямое воздействие на систему. Ее воздействие всегда заметно и проявляется в модификации или нарушении работоспособности системы. Пассивная атака проводится без непосредственного влияния на систему. Ее воздействие трудно заметить, потому что она не имеет пря-

мого воздействия. Это может быть тайная прослушка или наблюдение. Для выполнения сценария атаки используется инструментарий. Инструментарий делится в зависимости от того, насколько сложно реализовать атаку. Например, простая атака деаутентификации может быть реализована с помощью свободного программного обеспечения. Розовым цветом выделены компоненты характеристик сценария.

Реализация атаки несет последствия, то есть влияние на информацию, окружающую среду или человека. Последствия могут быть определены в зависимости от цели атаки.

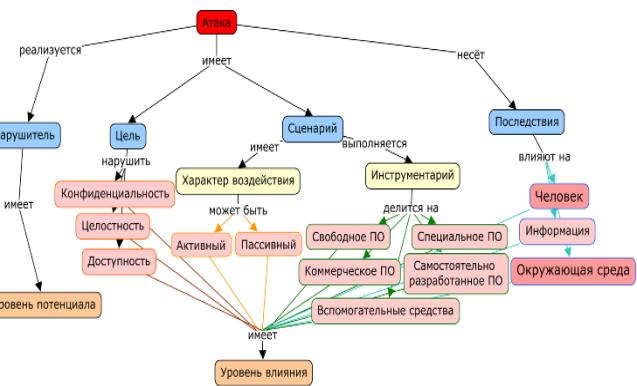
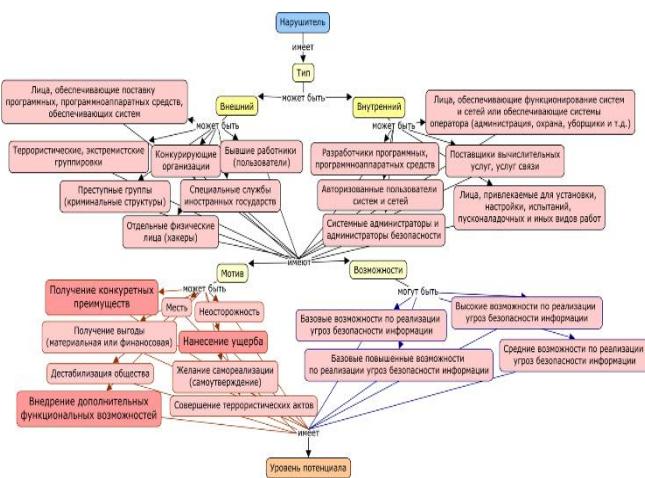


Рис. 7. Онтология атаки

Атака реализуется нарушителем. У нарушителя есть два типа, которые на рис. 8 выделены желтым цветом: внешний и внутренний. Внешний нарушитель находится вне информационной системы и ему необходимо получить доступ к системе. Внутренний нарушитель находится внутри информационной системы, но он также может выполнять инструкции внешнего нарушителя. Виды нарушителей (выделены розовым цветом) определены в соответствии с Методикой оценки угроз безопасности информации ФСТЭК от 5 февраля 2021 года [7].

Нарушитель имеет мотив и возможности. Мотив нарушителя отражает его заинтересованность в реализации угрозы, его некоторая цель. Возможности нарушителя показывают его компетентность и оснащенность необходимыми ресурсами для реализации атаки. На рисунке они обозначены желтым цветом. Розовым обозначены их компоненты. Как мотив, так и возможности определены в соответствии с Методикой оценки угроз безопасности информации ФСТЭК от 5 февраля 2021 года.

Стоит отметить, что уровень возможностей нарушителя связан с его видом и компетентными возможностями. Базовые возможности позволяют реализовать известные угрозы с использованием общедоступных инструментов. Базовые повышенные позволяет реализовать угрозы, направленные на неизвестные (недокументированные) уязвимости, с использованием свободного программного обеспечения. Средние возможности позволяют реализовать угрозу с помощью самостоятельно разработанного программного обеспечения. Высокие возможности дают практическую неограниченные возможности по реализации для нарушителя.



*Рис. 8. Онтология нарушителя*

Угроза реализуется за счет эксплуатации атакой уязвимостей, которые содержатся в СФХ. На рис. 9 представлена типовая классификации уязвимости в соответствии с ГОСТ Р 56546-2015 Защита информации. Уязвимости информационных систем. Классификация уязвимостей информационных систем [12]. Уязвимость имеет тип и класс (желтый цвет).

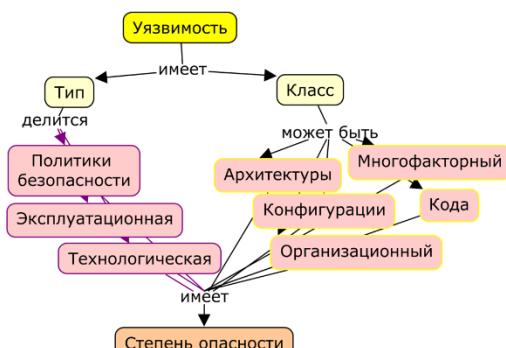
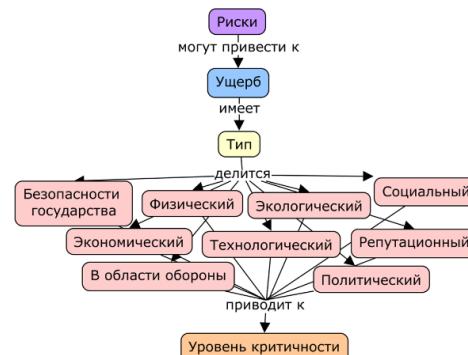


Рис. 9. Онтология уязвимости

Тип уязвимости – это причина атаки. На рисунке типы окрашены розовым цветом. Так уязвимости политики безопасности связаны с наличием пробелов безопасности в системе обеспечения безопасности объекта. Эксплуатационные уязвимости возникают в результате неправильной настройки программно-аппаратного обеспечения. Технологические уязвимости возникают в процессе проектирования и разработки системы, они проявляются в недостаточной и неправильной реализации функций системы.

Класс уязвимости – это место возникновения уязвимости. На рисунке классы также выделены розовым цветом. Уязвимость архитектуры возникает в процессе проектирования системы. Уязвимость конфигурации возникает в процессе применения параметров настроек программного обеспечения системы. Организационная уязвимость возникает либо при несоблюдении правил эксплуатации системы, либо в связи с отсутствием организационных мер защиты. Уязвимость кода возникает в процессе разработки системы. Многофакторная уязвимость возникает в результате нескольких недостатков различных типов.

Угрозы приводят к рискам, которые могут повлечь за собой ущерб (рис. 10). Типы ущербов определены в соответствии с Методикой оценки угроз безопасности информации ФСТЭК. Типы ущерба связаны с теми областями, в которых от реализации угрозы могут наступить негативные последствия. К негативным последствиям от реализации угрозы безопасности относятся события, наступление которых в результате успешной реализации угрозы безопасности может привести к нарушению законодательства Российской Федерации и (или) социальному, экономическому (финансовому), политическому, технологическому, экологическому ущербу, ущербу в области обеспечения обороны страны, безопасности государства и правопорядка, ущербу репутации или иным негативным последствиям, установленным законодательством Российской Федерации или определенным по результатам проведенной оценки ущерба (рисков).



*Рис. 10. Онтология риска*

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования была разработана концепция базы знаний в области безопасности КФС с учетом всех концептов, которые могут влиять на безопасность объекта защиты, построена онтология представления знаний о безопасности КФС и разработана архитектура базы знаний в области информационной безопасности КФС на основе интеграции онтологических моделей представления знаний для накопления знаний в области безопасности КФС и их дальнейшего анализа.

Анализ российских и зарубежных работ о КФС помог узнать об архитектуре КФС и имеющихся пробелах безопасности.

Анализ структурно-функциональных характеристик КФС позволил определить важнейшие уровни СФХ в КФС и дать точное понимание из каких компонентов состоит система.

Разработка базы знаний в области информационной безопасности КФС дала понимание о том, какие модули КФС стоит защищать и на каких уровнях происходит наиболее частые нарушения информационной безопасности.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем особую благодарность своему научному руководителю Басан Елене Сергеевне, доценту кафедры Безопасности информационных технологий Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета за бесценный опыт, переданный нам во время проведения научных исследований, и чуткое наставничество.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Jiang Guozhang et al.* Model knowledge matching algorithm for steelmaking casting scheduling // Int. J. Wirel. Mob. Comput. – 2018. – 15. – P. 215–222.
2. *Xu Binzi et al.* Knowledge network model of the energy consumption in discrete manufacturing system // Modern Physics Letters B. – 2017. – 31. – P. 1740100.
3. *Массель А.Г., Гаськова Д.А.* Онтологический инжиниринг для разработки интеллектуальной системы анализа угроз и оценки рисков кибербезопасности энергетических объектов // Онтология проектирования. – 2019. – № 2 (32). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ontologicheskiy-inzhiniring-dlya-razrabotki-intellektualnoy-sistemy-analiza-ugroz-i-otsenki-riskov-kiberbezopasnosti-energeticheskikh> (дата обращения: 04.08.2022).
4. *Jamaludin J., Mohd Rohani J.* Cyber-Physical System (CPS): State of the Art. // Proceedings of the 2018 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube). – Sudan, 2018. – P. 1-5.
5. *Гаврилова Т.А.* От инженерии знаний к онтологическому инжинирингу. – URL: <http://www.posp.raai.org/data/posp2005/gavrilova/gavrilova.html> (дата обращения: 20.07.2022).
6. Управление рисками информационной безопасности (конспект лекций). – URL: <https://www.securityvision.ru/blog/upravlenie-riskami-informatsionnoy-bezopasnosti-konsept-lektsii/> (дата обращения: 22.07.2022).
7. Методический документ. Методика оценки угроз безопасности информации. – Утв. ФСТЭК России февр. 2021.
8. ГОСТ Р 50922-2006. Защита информации. Основные термины и определения. – Стандартинформ. – М.: Стандартинформ. 2008. – 12 с.
9. Структура и состав информационных систем. – URL: [https://studopedia.ru/3\\_35522\\_struktura-i-sostav-informatsionnoy-sistemi.html](https://studopedia.ru/3_35522_struktura-i-sostav-informatsionnoy-sistemi.html) (дата обращения: 20.05.2022).
10. Сердюк В.А. Организация и технологии защиты информации: обнаружение и предотвращение информационных атак в автоматизированных системах предприятий. – М.: Изд. дом Гос. ун-та – Высшей школы экономики, 2011. – 572 с.
11. Татьяна Гаврилова. Онтологический инжиниринг. – URL: [http://www.big.spb.ru/publications/bigs pb/km/ontolog\\_engeneering.shtml?print](http://www.big.spb.ru/publications/bigs pb/km/ontolog_engeneering.shtml?print) (дата обращения: 30.07.2022).
12. ГОСТ Р 56546-2015 Защита информации. Уязвимости информационных систем. Классификация уязвимостей информационных систем. – М.: Стандартинформ. 2018. – 18 с.

# Оптимизация потоков данных в контексте обеспечения безопасности телекоммуникационной сети САО РАН

**Величко Алексей Михайлович**  
САО РАН  
Нижний Архыз, Россия  
*vam@sao.ru*

**Марухно Андрей Сергеевич**  
САО РАН  
Нижний Архыз, Россия  
*mas@sao.ru*

**Сакс Виктория Викторовна**  
Краснодар, Россия  
*saxvictoria@gmail.com*

**Яковенко Андрей Васильевич**  
САО РАН  
Нижний Архыз, Россия  
*yakov@sao.ru*

**Витковский Владимир Валентинович**  
САО РАН  
Нижний Архыз, Россия  
*vvv@sao.ru*

**Малькова Галина Александровна**  
САО РАН  
Нижний Архыз, Россия  
*mga@sao.ru*

**Желенкова Ольга Петровна**  
САО РАН  
Нижний Архыз, Россия  
*zhe@sao.ru*

**Аннотация.** Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук (САО РАН) является крупнейшим центром наземной астрономии и обеспечивает наблюдения на 6 м оптическом телескопе БТА и радиотелескопе РАТАН-600 с антенной диаметром 600 м для российских и иностранных исследователей. Телекоммуникационная сеть обсерватории является важнейшей инфраструктурной составляющей, обеспечивающей как коммуникацию внутри обсерватории, так и взаимодействие со сторонними организациями. В свете современных реалий при постоянно растущем объеме передаваемой информации, а также при растущем количестве хакерских обращений управление потоками данных и защищенность серверов и всей сети обсерватории требуется оптимизация архитектуры системы. В работе представлена история телекоммуникационной сети обсерватории, особенности ее архитектуры и проект ее модернизации.

**Abstract.** The Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (SAO RAS) is the largest center of ground-based astronomy and provides observations on the 6 m BTA optical telescope and the RATAN-600 radio telescope with an antenna 600 m in diameter for Russian and foreign researchers. The telecommunications network of the observatory is the most important infrastructural component that provides both communication within the observatory and interaction with third-party organizations. In the light of modern realities, with the constantly growing volume of transmitted information, as well as with the growing number of hacker attacks, data flow management and security of servers and the entire observatory network require optimization of the system architecture. The paper presents the history of the telecommunications network of the observatory, the features of its architecture and the project of its modernization.

**Ключевые слова:** телекоммуникационная сеть, оптимизация запросов, информационная безопасность.

**Keywords:** telecommunications network, query optimization, information security.

Разработка частично поддержана грантом Министерства науки и высшего образования РФ №075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003).

## I. ВВЕДЕНИЕ

Специальная астрофизическая обсерватория РАН (САО РАН) обладает двумя крупнейшими российскими астрономическими инструментами и обеспечивает наблюдения на них исследователям из других российских и зарубежных институтов. В обсерватории имеются четыре центра, разделенных географически. Один находится на верхней научной площадке (ВНП), где располагаются оптические телескопы, второй – на радиотелескопе РАТАН-600, третий – нижняя научная площадка (ННП), где располагается основные подразделения, четвертый – Санкт-Петербургский филиал обсерватории (СПбФ САО РАН). В реалиях современной экономической и политической ситуации проведение наблюдательного процесса и обеспечение бесперебойного функционирования института не мыслимо без высокоэффективной и надежной телекоммуникационной сети.

Этой инфраструктурной составляющей в обсерватории всегда уделялось особое внимание. Уже в 1984 г. была реализована первая локальная сеть, на двадцать лет позже первой локальной сети, разработанной в Ливерморской лаборатории (США), но раньше всех других институтов в советской астрономии [1]. В 1992 г. была создана полноценная локальная вычислительная сеть (ЛВС) с включением в нее в качестве узлов имеющихся на ННП персональных компьютеров типа и обеспечен информационный обмен между ними и доступ к серверам обсерватории. Создание локальной сети было выполнено на основе протокола TCP/IP поверх ArcNet. В 1993 г. выполнено объединение сегментов ННП – РАТАН-600 модемной связью, переход с протоколов UUCP на SLIP по мере создания выделенных каналов связи. Серверы 6-м оптического Большого азимутального телескопа (БТА) соединены с сетью ННП через кабельную пару модемами на скорости 9600 бит/с.

С 1995 г. производилось постепенное переоснащение и развитие локальных сетей обсерватории: переход на Ethernet, внедрение серверов, выполняющих функции маршрутизаторов и серверов удаленного доступа. Модемный канал ННП-РАТАН был переведен с аналоговой аппаратуры на цифровую. Были разработаны средства для подключения PPP, SLIP и dial-up сервисов на расположенных в регионе наблюдательных станциях других астрономических учреждений России. Автоматизированная система управления (АСУ) БТА была дополнена средствами сетевого доступа для обеспечения возможности удаленного управления. Были разработаны и реализованы web- и ftp-серверы.

Развитие ЛВС продолжалось в направлении внедрения новой архитектуры компьютерной сети с использованием маршрутизаторов и коммутаторов фирмы Cisco. При этом максимальная производительность межсерверного соединения увеличилась до 100 Мбит/с. Эта архитектура позволила интегрировать разрозненные участки локальных сетей обсерватории в единое многосвязное адресное пространство.

Между ВНП и ННП были введены в эксплуатацию два параллельных IP-канала – проводной (160 Кбит/с) и радио (2 Мбит/с), проложены каналы (10 Мбит/с) между телескопами БТА и Цейсс-1000, БТА и Цейсс-600 и внедрен радиоканал (820 Кбит/с) между БТА и 60-см телескопом наблюдательной станции Казанского государственного университета (КГУ). Внедрены два синхронных проводных ( $2 \times 16.8$  Кбит/с) канала между ННП и РАТАН-600, подключена к сети САО станция Института прикладной астрономии РАН.

Введен в строй канал цифровой радиосвязи в ISM-диапазоне между пунктами Цейсс-1000 и радиоцентром в п. Сарытиз (52 км). Оборудованы и введены в строй узлы сети SAO-EDU с размещением телекоммуникационного оборудования в п. Сарытиз и городском узле связи г. Черкесска. Организовано подсоединение сети SAO-EDU и маршрутизация в Интернет через РГУ (Ростовского государственного университета (РГУ) по арендованному каналу Ростов-на-Дону – Черкесск производительностью 2 Мбит/с. Отлажено программное обеспечение маршрутизаторов и средств мониторинга состояния каналов связи и качества сигнала оборудования радиосвязи.

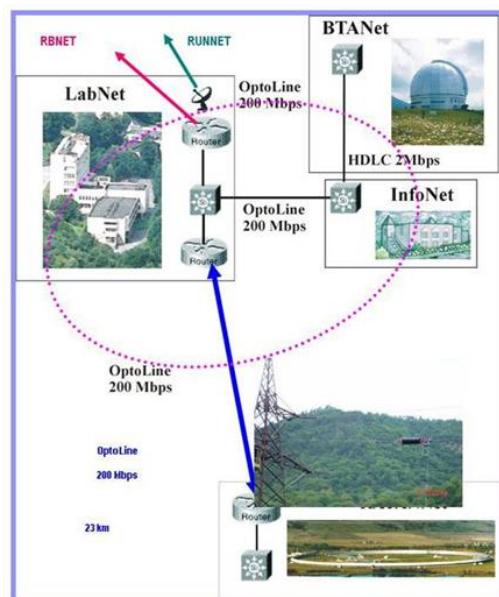
Реализован совместный способ передачи телефонии и данных Интернет по организованному каналу связи САО – Черкесск с использованием комбинирования средств ISDN (Integrated Services Digital Network) и VoIP (Voice over Internet Protocol).

В 2000 г. были созданы и введены в штатную эксплуатацию каналы связи ННП – БТА – оптоволоконный (скорость передачи 200 мегабит) и кабельный резервный (2 мегабит). Разработана и внедрена в эксплуатацию программно-аппаратная система удаленного наведения спутниковой антенны и проведена модернизация канала Интернет с помощью высокоскоростного спутникового модема. В 2002 г. разработана и введена в эксплуатацию высокоскоростная оптоволоконная линия связи ННП-РАТАН-600 протяженностью 22 км.

В 2005 г. основная магистраль сети была переведена на 1G Ethernet, а через год установлены внешние серверы САО РАН в РосНИИРОС. На них размещено ак-

тивное зеркало сайта для обеспечения скоростного доступа к информационным ресурсам обсерватории произвольному числу пользователей. Организована внешняя виртуальная сеть обсерватории, к которой была подключена к общей сети локальная сеть СПбФ САО РАН.

В 2015 г. завершено создание основного телекоммуникационного канала сетевой инфраструктуры САО РАН (SAONet backbone) – оптоволоконной линии ВНП-ННП со скоростями до 40 Гбит/с (рис. 1).



*Рис. 1. Схема телекоммуникационно-вычислительной сети обсерватории*

## II. АРХИТЕКТУРА СЕТИ ОБСЕРВАТОРИЙ

Как уже упоминалось выше, подразделения САО РАН располагаются в четырех географически разнесенных локациях. Штаб-квартира находится в п. Нижний Архыз, где располагаются административные, научные, инфраструктурные подразделения. ВНП находится в 16 км от ННП. Здесь располагаются оптические телескопы и инфраструктурные подразделения. В 22 км от ННП находится радиотелескоп РАТАН-600 с административными, научными и инфраструктурными подразделениями. СПбФ находится около Главной астрономической обсерватории РАН в Пулково, где также есть административные, научные и инженерно-технические подразделения. Кроме этого, в обсерватории часто проводятся конференции, приезжают на практики студенты из университетов Москвы, Санкт-Петербурга, Ростова, Казани, Ставрополя, а также сотрудники других институтов для проведения совместных работ. В обсерватории располагаются информационные ресурсы – базы данных, архивы наблюдений, каталоги, доступ к которым предоставляется мировому астрономическому сообществу. Сотрудники обсерватории в своей научной работе также используют общедоступные мировые астрономические ресурсы.

### III. НИЗКОУРОВНЕВЫЙ ДИЗАЙН ЛВС ОБСЕРВАТОРИИ

По оценкам экспертов Международного центра безопасности Интернет (CERT Coordination Center) число инцидентов, связанных с нарушениями сетевой безопасности

ности, выросло с 1988 г. в 10 тыс. раз. В современных сетях передачи данных можно выделить четыре основные группы таких угроз:

- вирусные атаки;
- рассылка спама;
- атаки типа DoS (denial-of-service, отказ в обслуживании) и наиболее опасная их разновидность – распределенная атака DDoS (distributed denial-of-service);
- атаки с использованием уязвимостей ПО открытых информационных сервисов, ошибок программирования и настройки.

В разрабатываемом проекте модернизации и оптимизации ЛВС обсерватории выделяются следующие задачи:

- защита от внешних и внутренних инцидентов, связанных с нарушением сетевой безопасности;
- контроль, разграничение и управление потоками передаваемой информации;
- организация безопасного взаимодействия между сегментами сети, включая предоставление набора сервисов в зависимости от функциональности сегмента.

Модернизировать архитектуру сети предполагается с использованием оборудования фирмы Cisco — межсетевых экранов и маршрутизаторов. Эти устройства могут выполнять одинаковые функции по обеспечению безопасности в сети:

- конфигурирование списков доступа;
- NAT (Network Address Translation, трансляция сетевых адресов) и PAT (Port Address Translation, трансляция порт-адреса) трансляция адресов;
- VPN (Virtual Private Network, виртуальная частная сеть) - подключение удаленных пользователей;
- инспекция сессий.

В проекте используются технологии VRF (Virtual Routing and Forwarding), MPLS (Multiprotocol Label Switching), BGP (Border Gateway Protocol, протокол границного шлюза) и VPN.

VRF – это технология, которая позволяет нескольким экземплярам таблицы маршрутизации сосуществовать на одном и том же маршрутизаторе [2]. Каждый VRF представляет собой замкнутое независимое пространство, недоступное из области памяти глобальной таблицы маршрутизации или таблиц маршрутизации других VRF. Технология позволяет использовать одни и те же или перекрывающиеся IP-адреса, которые не конфликтуют друг с другом.

MPLS – механизм, осуществляющий передачу данных от одного узла сети к другому с помощью меток [3]. В сети, основанной на MPLS, пакетам данных присваиваются метки. Передача пакета данных другому узлу сети выполняется только на основании значения присвоенной метки без необходимости изучения самого пакета данных. Это позволяет создать сквозной виртуальный канал, независимый от среды передачи и использующий любой протокол передачи данных.

BGP – протокол динамической маршрутизации [4]. На текущий момент является основным протоколом динамической маршрутизации в сети Интернет. BGP предназначен для обмена информацией о достижимости подсетей между автономными системами (AS), то есть группами маршрутизаторов под единым техническим и административным управлением, использующими протокол внутридоменной маршрутизации для определения маршрутов внутри себя и протокол междоменной маршрутизации для определения маршрутов доставки пакетов в другие AS. Выбор наилучших маршрутов осуществляется исходя из правил, принятых в сети.

VPN-технологии позволяют расширить частную сеть через публичную сеть, что дает возможность пользователям отправлять и получать данные через общедоступные сети, как если бы их вычислительные устройства были напрямую подключены к частной сети [5]. Преимущества VPN включают увеличение функциональности, безопасности и управления частной сетью. Обычно используются для удаленных сотрудников. Подключение через VPN позволяет снизить вероятность утечки данных, например логинов или паролей, при подключении через публичные wifi-точки.

Технологии MPLS совместно с BGP обеспечивают разделение пользовательских пространств с коммутацией по меткам.

Проведем сравнение возможности и функциональности оборудования фирмы Cisco – межсетевых экранов и маршрутизаторов. Следует отметить, что маршрутизатор имеет некоторые преимущества перед межсетевым экраном, а именно, обеспечивает разделение сетевого трафика путем определения его в разные VRF-таблицы. Межсетевой экран может использовать множественные контексты, числом не более 3-х. В нашем случае изолировать все сети друг от друга на сетевом уровне не получается, поскольку количество сетей превышает количество контекстов. При работе с BGP межсетевой экран не расчитан на работу с FV (full view) таблицей маршрутизации. В обсерватории есть несколько точек сопряжения с Интернет-провайдером и для разделения и балансировки по каналам необходимо хранить FV. На устройствах межсетевого экрана нет логических туннельных интерфейсов GRE (Generic Routing Encapsulation) / VTI (Virtual Tunnel Interface). Конфигурация туннелей через публичные сети из-за этого становится труднореализуемой.

В плане качества обслуживания QoS (Quality-of-Service) настройки межсетевого экрана ограничены таким образом, что невозможно создать несколько очередей и к каждой очереди применить или свойство приоритетной, или назначить ограничитель (policer). Пакеты в приоритетной очереди будут отправляться устройством в сеть в первую очередь. В плане QoS маршрутизатор функциональнее. Необходимо как минимум разделять все пользовательские пространства MPLS/VPN и иметь возможность балансировки трафика в/из интернет используя BGP с его особенностями, такими как учет пропускной способности канала.

Одним из ключевых сервисов опорной сети IP/MPLS является сервис обеспечения независимых информационных пространств подразделений обсерватории (рис. 2). Для обеспечения выполнения требований изолирования

подразделений на сети развернута совокупность или MPLS/VPN. Каждый VRF представляет собой замкнутое независимое пространство, недоступное из области памяти глобальной таблицы маршрутизации или областей памяти, в том числе таблиц маршрутизации других VRF.

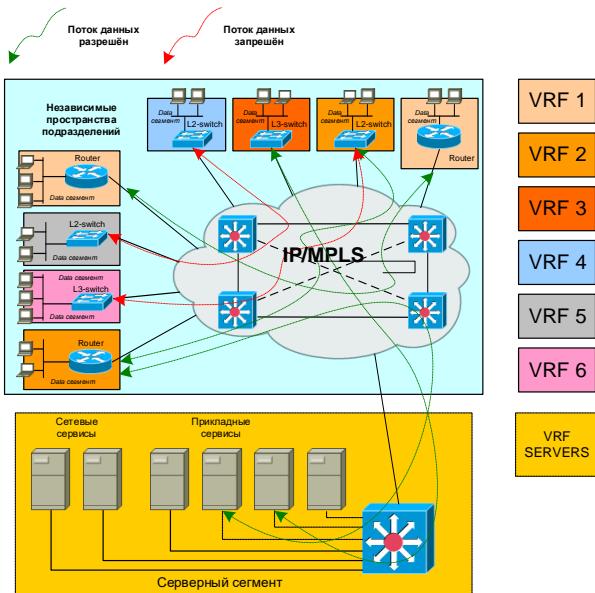


Рис. 2. Схема VRF различных подразделений и диаграмма взаимодействий

Данное решение позволяет ограничить каждое подразделение от любого влияния смежных подразделений. В случае, когда у подразделения несколько локаций, то все последние могут быть объединены в единое пространство, которое, по-прежнему будет недоступно из информационных пространств других подразделений.

Каждый создаваемый VRF имеет своё собственное информационное пространство, не зависимое от других VRF. Адресация и маршрутизация, в общем случае, каждого VRF независима и может строиться с использованием различных диапазонов адресов и протоколов маршрутизации. Имеются ограничения на использование диапазонов IP адресации.

Для начальной стадии работ было выделено несколько сегментов сети, которые будут обслуживаться независимыми VRF, а именно: сегмент доступа в сеть Интернет, сегмент администрации, сегмент бухгалтерии, подразделения ННП, подразделения ВНП, подразделения РАТАН-600, сегмент сетевых администраторов, макетные мастерские, тестовый сегмент, а также серверный сегмент и сегмент управления сетевыми устройствами. Предусмотрено добавление новых сегментов по мере возникающей необходимости.

Для функционирования серверного сегмента выделяется отдельное информационное пространство (VRF SERVERS), в которое размещается оборудование предоставляющее вычислительные ресурсы для сервисов. Для обеспечения связности приложений, работающий на оборудовании серверного сегмента (VRF SERVERS) и на клиентских ПК подразделений, VRF SERVERS построен по технологии Hub & Spoke. При таком дизайне – VRF SERVERS является Hub-площадкой, а VRF подразделений являются Spoke-площадками. Связность обеспечива-

ется между всеми Spoke-площадками и Hub-площадкой. Связность между разными Spoke-площадками (различные VRF) запрещена. Информационное взаимодействие отображено на рисунке 3. Связность обеспечивается путём импорта и экспорта маршрутов в определённой конфигурации.

Пространство серверного сегмента в свою очередь разделяется на подпространства (пространства или сегменты), в каждое из которых размещаются комплексы, обслуживающие отдельные приложения и/или сервисы.

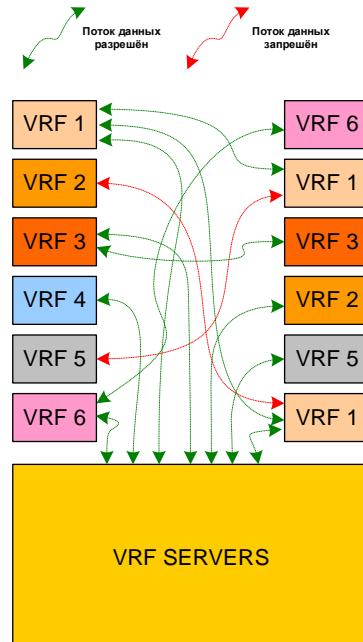


Рис. 3. Информационное взаимодействие серверного сегмента и других сегментов сети

Отдельно выделяются следующие сегменты:

- пространство для размещения серверов приложений, обеспечивающих работоспособность сети. В данный сегмент размещаются сервера управления, мониторинга сети, а также другие приложения, необходимые для обеспечения её работоспособности;
- пространство для размещения серверов приложений, обеспечивающих работу сотрудников подразделений. В данный сегмент (или совокупность сегментов) размещаются сервера с приложениями и специализированным ПО: сервер доступа к VPN;
- пространство для размещения серверов приложений, обеспечивающих работоспособность сервисов с вещанием мультикаста. В данный сегмент размещаются сервера вещания, рабочие места с клиентскими ПО, обеспечивающими связь;
- пространство, доступное для подразделений. Используется для обеспечения доступа к сервису Интернет. Данный сегмент предоставляет доступ в сеть Интернет всем клиентским VRF и внутренним интерфейсам межсетевых экранов.

Для работоспособности всей сети необходимо чтобы все рабочие станции имели сетевые адреса из единого диапазона, т.е. каждый узел должен быть доступен с точ-

ки зрения маршрутизации любому другому узлу сети. Перекрытие диапазонов IP-адресов не допустимо. В связи с тем, что узлов в сети достаточно большое количество, целесообразно использовать приватные диапазоны IP-адресов. Деление сетевого пространства производится блоками с учётом функционального назначения пространства, к которому назначается блок и его «ёмкости» (например, количество ПК для пространства подразделений или количества серверов для пространства серверов). Каждый блок выбирается с учётом дальнейшего роста сети.

Для работы сервисов на сети необходимо обеспечить распространение маршрутной информации между всеми сетевыми элементами. Для распространения маршрутной информации используется протокол динамической маршрутизации. Адресные пространства сети разделяются на адресацию устройств, обслуживающих MPLS-домен (GRT) и адресацию VPN (VRF).

Пространства как в GRT, так и в каждом VRF, должны быть уникальными, поскольку используется технология Hub&Spoke для доступа к серверному сегменту. Для распространения маршрутной информации GRT, информации о номерах MPLS меток, маршрутной информации в VRF и в дальнейшем таблиц глобальной маршрутизации, используются следующие протоколы и технологии: протокол динамической маршрутизации OSPF (Open Shortest Path First) [6], протокол распространения MPLS меток LDP (Label Distribution Protocol) [7] и протокол внутреннего граничного шлюза iBGP (Internal Border Gateway Protocol).

Поскольку сеть имеет более одного центрального устройства, целесообразно использовать протокол динамической маршрутизации. При дальнейшем развитии сети возможны избыточные связи с разной полосой пропускания, или необходимостью балансировки нагрузки, поэтому выбран протокол, позволяющий учитывать «цену» за переход между устройствами. Протокол OSPF является стандарт-

ным, поддерживающимся многими производителями в полном объёме и удовлетворяющим всем поставленным требованиям. Данный протокол применяется для распространения внутренней маршрутной информации.

LDP необходим для распространения MPLS-меток между интерфейсами маршрутизаторов, на которых включена функциональность MPLS. IBGP необходим для распространения маршрутной информации VRF между PE-устройствами – устройствами терминации VPN-интерфейсов пользовательских сегментов.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа частично поддержана грантом "Многоволновое исследование нестационарных процессов во Вселенной" Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Витковский В.В. Информатика в САО // Юбилейный сборник САО РАН. 50 лет / отв.ред. В.В. Власюк. – Нижний Архыз, 2018. – 408 с. – С. 99-124.
2. Virtual Route Forwarding Design Guide forVRF-Aware Cisco Unified Communications Manager Express, 2008. – 44 р. – URL: [https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/voice\\_ip\\_comm/cucme/vrf/design/guide/vrfDesignGuide.pdf](https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/voice_ip_comm/cucme/vrf/design/guide/vrfDesignGuide.pdf) (дата обращения 08.08.2022).
3. Rosen E., Viswanathan A. Multiprotocol Label Switching Architecture. – 2001. – 64р. – URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/pdfrfc/rfc3031.txt.pdf> (дата обращения 01.08.2022).
4. Rekhter Y., Li t., Hares S. A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4). – 2006. – 104р. – URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/pdfrfc/rfc4271.txt.pdf> (дата обращения 01.08.2022).
5. Tyson J., Pollette C., Crawford S. How a VPN (Virtual Private Network) Works, 2021. – URL <https://computer.howstuffworks.com/vpn.htm> (дата обращения 01.08.2022).
6. Moy J. OSPF Version 2. – 1998. – 244 р. – URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/pdfrfc/rfc2328.txt.pdf> (дата обращения 01.08.2022).
7. Andersson L., Minei I., Thomas B. LDP Specification. – 2007. – 135 р. – URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/pdfrfc/rfc5036.txt.pdf> (дата обращения 01.08.2022).

# Определение набора метрик для детектирования атак на КФС

**Басан Елена Сергеевна**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*ebasan@sedu.ru*

**Михайлова Василиса Дмитриевна**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*vmihaylova@sedu.ru*

**Шулика Мария Геннадьевна**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*mshulika@sedu.ru*

**Лесников Александр Александрович**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*alesnikov@sedu.ru*

**Могильный Антон Богданович**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*mogilnyy@sedu.ru*

**Аннотация.** Цель исследования разработать методику сбора данных и определить набор метрик, с помощью которых можно детектировать атаки на киберфизические системы. Задачи, которые необходимо решить в рамках научно-исследовательской работы: обзор киберфизических систем, анализ программного обеспечения для реализации атак, анализ работы киберфизических систем, экспериментальные работы и выявление закономерностей в работе киберфизических систем во время атак. Результат проделанной работы позволит быстро анализировать работу киберфизических систем и выявить аномалии в их работе. Эти данные позволят разработать автоматизированный программный продукт по обеспечению защиты системы и информации, проходящей через эту систему.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, киберфизические системы, атаки, метрики, защита.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время всё человечество пользуется техническими средствами, которые объединяются в киберфизическую систему. Каждая кибер-физическая система включает в себя разные характеристики и дополнительные компоненты, требующимся информационная безопасность. Защищенность является одним из важнейших показателей эффективности функционирования КФС, наряду с такими показателями как надежность, отказоустойчивость, производительность и т.п. Анализ защищенности является основным элементом таких взаимно пересекающихся видов работ как аттестация, аудит и обследование безопасности КФС. КФС обеспечивает работу между устройствами, которые могут передавать данные друг другу, которые могут являться конфиденциальными для корпорации или простого человека, из-за чего требуется их обезопасить от злоумышленников, которые в свою очередь могут узнать передаваемые данные, распространить их и повернуть их против вас.

## II. ОБЗОР КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кибер-физическая система – это комплексная система из вычислительных и физических элементов, которая регулярно получает данные из окружающей среды и использует их для дальнейшей оптимизации процессов управления.

В современном обществе большую популярность получили кибер-физические системы (КФС). Они включают в себя и умных роботов, и Интернет вещей (IoT), и беспилотные летательные аппараты (БПЛА), и многие другие технологии, которые могут быть использованы в разных сферах деятельности человека. Кибер-физические системы являются основой для развития следующих областей: умные производства, умная медицина, умные здания и инфраструктуры, умный город, умные автомобили, носимые устройства, мобильные системы, оборонительные системы, метеорология и др. С другой стороны КФС имеет большое количество уязвимостей, которые могут быть проэксплуатированы злоумышленником. Соответственно, атаки имеют последствия, как для самих КФС, так и для сферы, в которой они используются.

Главным принципом работы кибер-физических систем можно назвать глубокую взаимосвязь между физическими и вычислительными элементами. «Мозг» системы в виде искусственного интеллекта и других технологий получает данные от сенсоров в реальном мире, анализирует эти данные и использует их для дальнейшего управления физическими элементами. Благодаря такому взаимодействию кибер-физическая система способна эффективно работать в изменяющихся условиях, как аналог человеческого организма или современная компания, которая анализирует ситуацию на рынке, чтобы разработать именно тот продукт, который ему сейчас нужен. Причём цикл «управление – получение данных – обработка данных – управление» при налаженной работе системы каждый раз должен давать позитивный результат и создавать новую ценность.

КФС обычно представляет собой комплекс систем со следующими характеристиками: управление данными, определение программного обеспечения, повсеместное соединение, сопоставление между виртуальностью и реальностью, гетерогенная интеграция и самоуправление. По мере все более обширного и всестороннего применения КФС важность их надежности невозможно переоценить.

Однако из-за большого масштаба, высокой сложности и неоднородность СУЗ, их отказоустойчивость высока и существует много рисков безопасности, которые могут привести к огромным экономическим потерям или нарушения безопасности. Поэтому надежность, безопасность и конфиденциальность КФС очень важны.

Для реализации квалифицированной работы СУЗ необходимо обеспечить надежность аппаратных средств, надежность программного обеспечения и безопасность связи. Кроме того, восстановление после отказа также должно осуществляться быстро. Таким образом, тестирование КФС необходимо до реальной реализации [1].

В результате мы исследуем последние достижения в области тестирования КФС, рассматривая тест-методы и испытательные стенды. Для методов тестирования мы ориентируемся в основном на главные парадигмы тестирования и лежащие в их основе вспомогательные технологии, а также некоторые нефункциональные тесты.

Существует несколько углубленных обзоров КФС, которые фокусируются на двух аспектах: разработка и применение КФС, а также тестирование и проверка.

Разработка КФС обсуждается с точки зрения системной модели, технологии обработки информации и разработки программного обеспечения. Четыре основные исследовательские задачи (безопасность, энергопотребление, мобильная динамическая среда и стабильность системы).

### III. АРХИТЕКТУРА ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ

Исследование проводилось на двух киберфизических системах. Первым стендом является БПЛА, оператор и спутник, между которыми передаются данные. Схема стендана представлена на рис. 1.

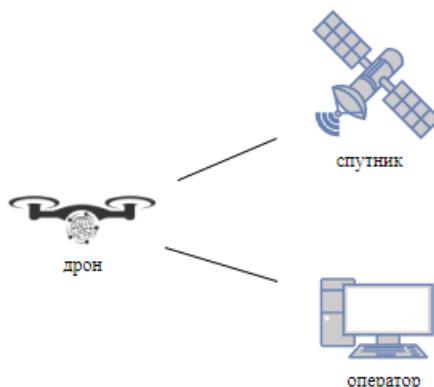


Рис. 1. Стенд с БПЛА

Вторым стендом является конвейерная лента с датчиками, которые сигнализируют о том, что свет от светодиода не падает на фототранзистор, из-за наличия объекта. Таким образом, есть возможность отслеживать изделие в одной из точек: в начале или в конце конвей-

ерной ленты и также останавливать подачу напряжения на мотор в случае достижения изделия одной из этих точек. Также лента включает в себя датчики, который сигнализирует высоким сигналом о том, что вертикально движущийся мотор достиг минимума или максимума своего пути. Таким образом, есть возможность останавливать подачу напряжения на мотор в случае достижения им экстремума. Также стенд включает в себя три Raspberry Pi. На этих устройствах реализована логическая часть системы, которая построена на двух управляющих устройствах и одном устройстве мониторинга. Функциональные возможности трех микрокомпьютеров Raspberry Pi [2]:

- HMI – Человеко-машинный интерфейс, отвечает за передачу данных от терминала пользователя.
- PLC – Программно-логический контроллер – отвечает за весь алгоритм работы системы, обрабатывает сигналы с датчиков и подает управляющие сигналы на Remote I/O.
- SCADA – Система диспетчерского управления и сбора данных – все управляющие сигналы и данные с датчиков отображаются в таблице SCADA, изменяющиеся динамически.

Физическое управление системой происходит с помощью двух микроконтроллеров – STM. И также в эту КФС входят управляющее устройство всей системы и тестирующее устройство. Все устройства соединены в одну сеть. Схема стендана представлена на рис. 2.

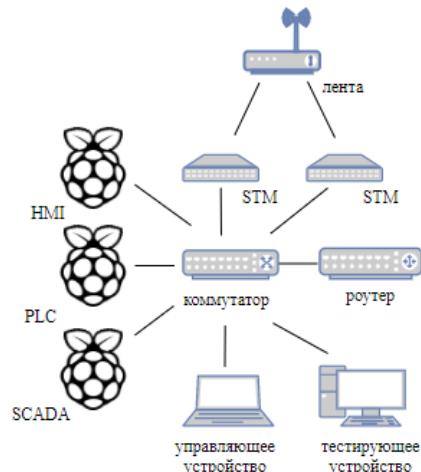


Рис. 2. Стенд конвейерная лента

### IV. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АТАК

Чтобы проводить атаки и анализировать их последствия, необходимо использовать такие программные средства, как Wireshark, который помогает просматривать трафик в сети, определять его загруженность, обнаруживать с каких и на какие устройства отправлялись данные, какие порты и протоколы передачи данных при этом использовались, Zenmap для анализа устройств в сети, протоколов передачи данных и наличие открытых/закрытых портов на этих же устройствах, PuTTY для установления соединения и управления устройствами, netwox для проведения атаки, а также утилиты hping3 и airgeddon тоже для проведения различного рода атак [3] и [4].

## V. РЕАЛИЗОВАННЫЕ АТАКИ

В рамках экспериментальных работ на киберфизические системы было реализовано множество атак таких, как деаутентификации, SYN-flood, UDP-flood, TCP Reset, Arp-spoofing.

Деаутентификация – это одна из разновидностей атак на беспроводную сеть, суть которой заключается в разъединение клиентов от их точек доступа. Атака деаутентификации реализовывалась с помощью инструмента Airgeddon-ng. Пример реализованной атаки можно увидеть на рис. 3.

```
vasilisa@vasilisa-Lenovo-ideapad-310-15IKB:~
```

14:27:19 Sending DeAuth (code 7) to broadcast -- BSSID: [64:70:02:A9:0A:5C]  
14:27:20 Sending DeAuth (code 7) to broadcast -- BSSID: [64:70:02:A9:0A:5C]  
vasilisa@vasilisa-Lenovo-ideapad-310-15IKB:~\$ sudo aireplay-ng --deauth 10 -a 64  
:70:02:A9:0A:5C wlp2s0  
ioctl(SIOCSIWMODE) failed: Device or resource busy  
14:28:16 Waiting for beacon frame (BSSID: 64:70:02:A9:0A:5C) on channel 3  
NB: this attack is more effective when targeting  
a connected wireless client (-c <client's mac>).  
14:28:16 Sending DeAuth (code 7) to broadcast -- BSSID: [64:70:02:A9:0A:5C]  
14:28:17 Sending DeAuth (code 7) to broadcast -- BSSID: [64:70:02:A9:0A:5C]  
14:28:17 Sending DeAuth (code 7) to broadcast -- BSSID: [64:70:02:A9:0A:5C]  
14:28:18 Sending DeAuth (code 7) to broadcast -- BSSID: [64:70:02:A9:0A:5C]  
14:28:18 Sending DeAuth (code 7) to broadcast -- BSSID: [64:70:02:A9:0A:5C]  
14:28:19 Sending DeAuth (code 7) to broadcast -- BSSID: [64:70:02:A9:0A:5C]  
14:28:19 Sending DeAuth (code 7) to broadcast -- BSSID: [64:70:02:A9:0A:5C]  
14:28:20 Sending DeAuth (code 7) to broadcast -- BSSID: [64:70:02:A9:0A:5C]  
14:28:20 Sending DeAuth (code 7) to broadcast -- BSSID: [64:70:02:A9:0A:5C]  
vasilisa@vasilisa-Lenovo-ideapad-310-15IKB:~\$ sudo aireplay-ng --deauth 30 -a 64  
:70:02:A9:0A:5C wlp2s0  
ioctl(SIOCSIWMODE) failed: Device or resource busy  
14:29:16 Waiting for beacon frame (BSSID: 64:70:02:A9:0A:5C) on channel 3  
NB: this attack is more effective when targeting  
a connected wireless client (-c <client's mac>).

Рис. 3. Стенд конвейерная лента

Например, команда для деаутентификации имеет вид: aireplay-ng -0 10 -a 00:00:00:00:00:00 wlan0mon. Команда состоит из определенных параметров и флагов, с помощью параметра «-0» можно выбрать тип атаки – деаутентификация. Число «10» означает количество отправляемых пакетов. С помощью «-a 00:00:00:00:00:00» выбирается MAC-адрес точки доступа. А «wlan0mon» – это интерфейс карты атакующего устройства [5].

В результате выполнения данной атаки пользователь не сможет получить доступ к объекту управлению, оборвется соединение. Атака совершается одинаково со всех устройств.

DoS-атака направлена на сервера или веб-ресурса, поэтому её часто называют атакой сетевого уровня или транспортного уровня. Цель атаки – привести к перегрузке сети, протокола передачи данных, порт или устройства. В результате может произойти следующее:

- пользователь не сможет получить доступ к сервису из-за его перегрузки;
- выведет из строя сеть;
- выведет из строя устройство.

SYN-атака – это разновидность DoS-атаки. При выполнении данной атаки происходит отправка в открытый порт сервера массы SYN-пакетов, не приводящих к установке реального соединения по тем или иным причинам, что влечет за собой создание «полуоткрытых соединений», которые переполняют очередь подключений, вынуждая сервер отказывать в обслуживании очередным клиентам [6].

Чтобы создать отказ в обслуживании, злоумышленник использует тот факт, что после получения исходного пакета SYN сервер ответит одним или несколькими пакетами SYN/ACK и дождется последнего шага в квитировании. Вот как это работает:

- злоумышленник отправляет на целевой сервер большое количество пакетов SYN, часто с поддельными IP-адресами;
- затем сервер отвечает на каждый запрос на подключение и оставляет открытый порт готовым для получения ответа;
- в то время как сервер ждет окончательного пакета ACK, который никогда не прибывает, злоумышленник продолжает отправлять больше пакетов SYN (прибытие каждого нового пакета SYN заставляет сервер временно поддерживать новое соединение с открытым портом в течение определенного периода времени, и как только все доступные порты были использованы, сервер неспособен нормально функционировать). Принцип работы можно увидеть на рис. 4.

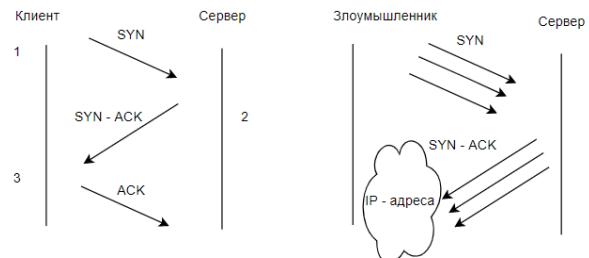


Рис. 4. TCP установление

UDP-flood – это разновидность DoS-атаки и сетевая атака типа «отказ в обслуживании», использующая бесgetSessionный режим протокола UDP. Заключается в отправке множества UDP-пакетов (как правило, большого объема) на определенные или случайные номера портов удаленного хоста, который для каждого полученного пакета должен определить соответствующее приложение, убедиться в отсутствии его активности и отправить ответное ICMP-сообщение «адресат недоступен». В итоге атакуемая система окажется перегруженной: в протоколе UDP механизм предотвращения перегрузок отсутствует, поэтому после начала атаки паразитный трафик быстро захватит всю доступную полосу пропускания, и полезному трафику останется лишь малая её часть. [7] Атака совершается одинаково со всех устройств. Принцип работы атаки можно увидеть на рис. 5.

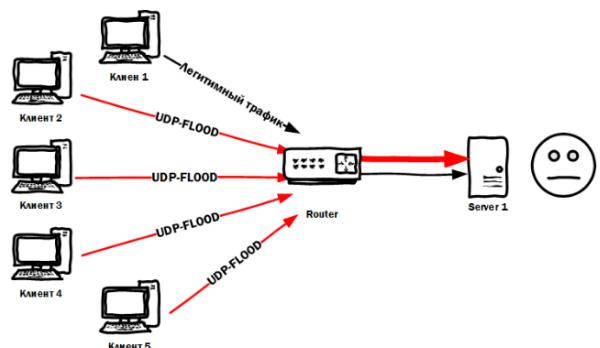


Рис. 5. Принцип работы

Атака TCP Reset, «фальшивые TCP Reset», «сбросы TCP», «спуфинг пакетов TCP reset» – способ манипулирования интернет-соединениями. В одних случаях так действуют злоумышленники, в других – легитимные пользователи.

Каждый TCP-пакет в рамках соединения несёт заголовок. В каждом из них есть бит флага сброса (RST). У большинства пакетов этот бит установлен в 0 и ничего не значит, но если он установлен в 1, это значит, что получатель должен немедленно прекратить использовать данное соединение: не посыпать пакетов с текущим идентификатором (на текущий порт), а также игнорировать все последующие пакеты этого соединения (согласно информации в их заголовках). По сути, сброс TCP моментально разрывает соединение [8].

Агр-spoofing – разновидность сетевой атаки, с использованием агр протокола. Атака является типом атаки «Человек по середине» и основана на недостатках канального агр протокола, который используется для установки соответствий между физическим и логическим адресом [9].

## VI. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СБОРА И АНАЛИЗА ДАННЫХ

Методика тестирования систем включает в себя этапы:

- сбор данных;
  - обработка и анализ данных.

Сбор данных осуществляется во время запуска системы, обычной работы и работы во время атак. Атаки делятся на:

- анализ сети;
  - деаутентификацию;
  - SYN Flood;
  - UDP-flood;
  - TCP Reset;
  - Arp-spoofing.

Во время работы КФС-конвейерная лента всегда запускается сервер по адресу 192.168.0.202 на 5000 порту. Сервер собирает в базу данных SQLite данные, пример баз данных изображено на рис. 6 и 7.

Рис. 6. База данных, часть 1

*Рис. 7. База данных, часть 2*

Данные включают в себя: количество передаваемых пакетов (tcp, udp, arp, icmp и olsr) на устройствах Raspberry Pi, а также сразу высчитывается общее количество пакетов tcp, udp, arp, icmp, olsr за один экспериментальный прогон системы в столбцы базы данных соответственно `tcp_total`, `udp_total`, `arp_total`, `icmp_total`, `olsr_total`. А также сервер собирает с устройств данные по параметрам ЦПУ, а именно его нагрузку и температуру. В таблице отображается `id` устройства Raspberry Pi и временная метка.

После каждого эксперимента сравниваются данные из таблицы базы данных между собой и выявляются аномальные значения, которые отличаются от обычной, нормальной работы киберфизической системы. Также могут проводиться математические вычисления для явного обнаружения аномалий в работе системы [9] и [10].

Экспериментальная работает заключается в выполнении однотипных и однообразных действий с различным временным интервалом работы или частичным исключением небольших действий после первоначального сканирования и анализа сети, которое осуществляется с помощью утилиты nmap. Временной интервал в разных видах экспериментах сохраняется в частоте 1-2-3-5-10-15 минутах. В результате чего можно определить разницу работы в разных промежутках времени и исключить неопасные для работы закономерности КФС. Если выполняются атаки на КФС, то экспериментальные работы тоже повторяется несколько раз с условиями во время выполнении экспериментов при нормальной работе. Алгоритм экспериментальной работы заключается в:

- запуск системы;
  - работа системы в нормальном режиме;
  - запуск атаки;
  - остановка атаки;
  - работа системы в нормальном режиме;
  - остановка работы системы.

После каждого выполненного шага алгоритма необходимо фиксировать время, сохранять собранные данные и фиксировать результат.

## VII. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СЫРЫХ ДАННЫХ

Этап «обработка и анализ данных» происходит после этапа «сбор данных», которое осуществляется с помощью базы данных SQLite. В результате выявления данных из базы данных можно определить, как изменяется количество пакетов, получаемых клиентом, сетевых пакетов во время атаки и при нормальных условиях. Эти значения отображены на рис. 8. А на рис. 9, как выглядит энергопотребление устройства при атаке и в нормальных условиях [11].

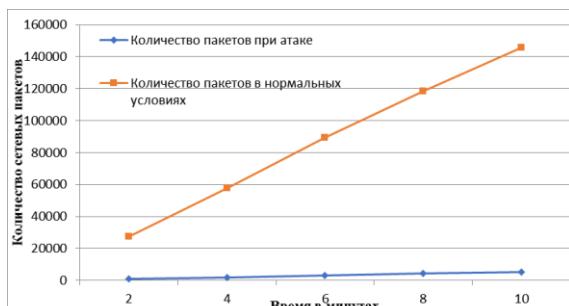


Рис. 8. Изменение количества получаемых сетевых пакетов

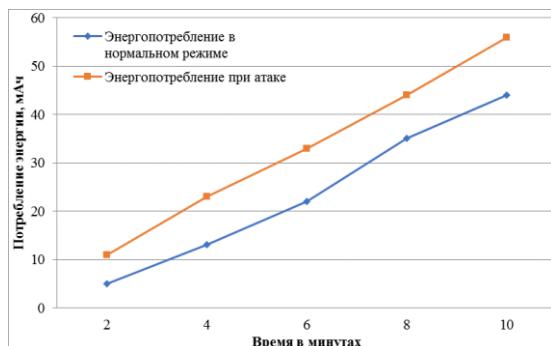


Рис. 9. Энергопотребление устройства при атаке и в нормальных условиях

Необходимо также отметить, что было зафиксировано изменение кибер-физического параметра – загруженность ЦПУ, как для состояния жертвы, так и для вредоносного состояния, что характеризует атаки. Анализ значений можно увидеть на рис. 10, где показано изменение показателя загруженность ЦПУ для трех типов состояния устройства.

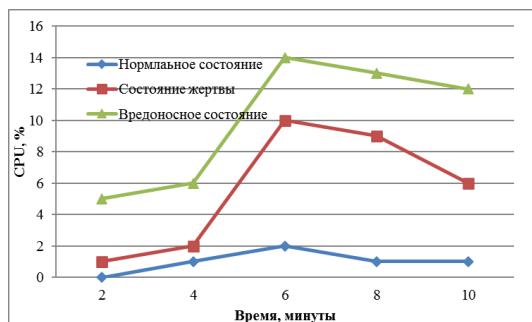


Рис. 10. Загруженность ЦПУ тестового устройства в трех состояниях

Наблюдался также рост сетевого трафика на устройствах, когда оно находилось в состоянии «во время атаки».

Рассмотрим более подробно трафик, проходящий между устройствами во время работы КФС с атакой SYN-flood. Трафик можно разделить на исходящий и входящий. Входящий трафик увеличивается настолько сильное, что первые 12 временных рядов даже кажутся нулевыми, на самом деле это не так, трафик есть, но воздействие атаки слишком сильное.

Рост сетевого трафика и рост водящего трафика можно увидеть на рис. 11 и 12.

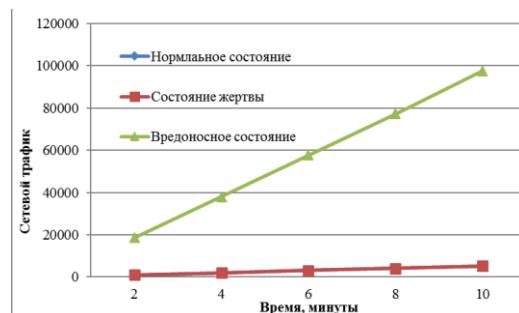


Рис. 11. Сетевой трафик устройства при атаке в трех состояниях

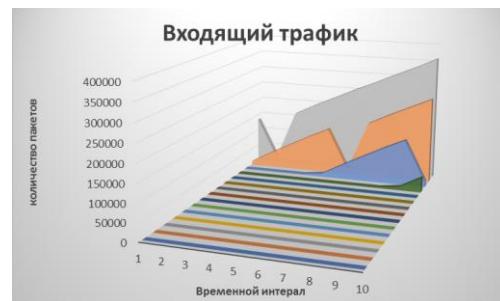


Рис. 12. Картина входящего трафика под воздействием атаки SYN-flood

Также изменилась картина исходящего трафика, видим увеличение количества пакетов на рис. 13.

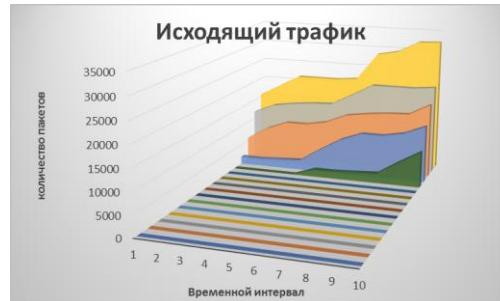


Рис. 13. Картина исходящего трафика под воздействием атаки SYN-flood

## VIII. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ НОРМАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Алгоритм обработки данных включает:

- анализ данных во время нормальной работы;
- анализ данных во время атаки;
- сравнение данных и выявление аномалий.

Обработка данных включает расчеты:

- математическое ожидание значения;
- среднеквадратичное значение;
- максимальное значение;
- минимальное значение;
- значения хи-квадрата;
- значение распределения Пуассона.

Идея обработки данных состоит в том, что строится нормальное распределение случайно величины, значения которых получены для некоторого количества врем-

менных участков. Далее, после того как нормальное распределение для заданного количества случайных величин построено и накоплена информация о некотором количестве новых временных участков, на которых зафиксировано значение случайно величины, необходимо построить новую функцию распределения вероятностей [12]. Для этого необходимо определить количество участков, через которое функция нормального распределения будет обновляться. То есть если у нас есть некоторое количество значений, для которых было построено нормальное распределение, и мы получили еще несколько новых значений случайной величины, то необходимо определить с каким смещением временного интервала нормальное распределение будет перестроено. Для этого необходимо будет определить два условия по формуле 1:

$$\begin{cases} (s, r, f, d) \geq m; \\ \Delta t = i. \end{cases} \quad (1)$$

где  $s$  – количество отправленных пакетов,  $r$  – количество принятых пакетов;

$f$  – перенаправленные пакеты;

$d$  – отброшенные пакеты;

$m$  – пороговое значение, которое задает минимально необходимое количество заданных промежутков времени, на которых было получено значение случайной величины;

$i$  – количество временных интервалов, на которые будет смещен ряд значений случайных величин для построения нового нормального распределения.

На сегодняшний день принцип определения пороговых значений  $m$ ,  $i$  еще не разработан. В этом исследовании предлагается установить, что минимальное количество случайных величин  $m$  целесообразно принять равным десяти, то есть каждое нормальное распределение будет строиться с использованием десяти значений, которые получены соответственно на десяти временных интервалах. Значение скользящего окна выбирается равным четырем, то есть при построении каждого нового нормального распределения будут использоваться четыре значения случайной величины, полученные в предыдущие интервалы, и два значения, полученные в последние интервалы. Этот способ построения нормального распределения обусловлен следующим [13]. Нормальное распределение сглаживает изменение случайной величины, и время начала атаки может не зафиксироваться, если распределение перестраивается каждый интервал времени. Если разброс значений значительный, то атака будет пропущена из-за того, что стандартное отклонение резко возрастет и может даже превысить значение ожидания. Поэтому минимальный размер скользящего окна для шести значений предлагается выбирать равным двум.

После определения начальных условий строится нормальное распределение.

Чтобы построить нормальное распределение после сбора данных о трафике узла, необходимо рассчитать математическое ожидание и среднеквадратичное значение, как показано в формулах 2–7.

$$M(s) = \int_{\Delta t-m}^{\Delta t+i} sf(s)ds \quad (2)$$

$$M(r) = \int_{\Delta t-m}^{\Delta t+i} rf(r)dr \quad (3)$$

$$D(s) = \int_{\Delta t-m}^{\Delta t+i} [s - M(s)]^2 f(s)ds \quad (4)$$

$$D(r) = \int_{\Delta t-m}^{\Delta t+i} [r - M(r)]^2 f(r)dr \quad (5)$$

$$\sigma(s) = \sqrt{D(s)} \quad (6)$$

$$\sigma(r) = \sqrt{D(r)}, \quad (7)$$

где  $M(s)$ ,  $M(r)$  – математическое ожидание для отправленных и полученных пакетов, оно также рассчитывается аналогичным образом для перенаправленных и отброшенных пакетов;

$D(s)$ ,  $D(r)$  это дисперсия случайной величины для показателей принятых и отправленных пакетов, также вычисляется для всех типов пакетов;

$\sigma(s)$ ,  $\sigma(r)$  – это среднеквадратичное значение для тех же параметров.

Для оценки данных кибер-физических параметров используется закон распределения Пуассона [14]. Пуассоновская модель  $P()$  обычно описывает схему редких событий: при некоторых предположениях о характере процесса появления случайных событий число событий, произошедших за фиксированный промежуток времени или в фиксированной области пространства, часто подчиняется пуассоновскому распределению – формула 8:

$$P(K_n) = \frac{\lambda^{K_n}}{K_n!} e^{-\lambda}, \quad (8)$$

где  $P$  – это функция вероятности распределения случайной величины по закону распределения Пуассона;

$\lambda$  – математическое ожидание, среднее число осуществления интересующего события в единице времени;

$e$  – число Эйлера.

Также для нормализации данных используется критерий Хи-квадрат. Для этого используется формула 9.

$$F\chi^2(A) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(A_{ij} - O_{ij})^2}{O_{ij}}. \quad (9)$$

На основе алгоритма обработки данных проанализированы данные при UDP-flood атаке, SYN-flood атаке, Arp-spoofing и нормальной работы КФС, которые представлены в табл. 1–4.

ТАБЛИЦА 1. ОБРАБОТАННЫЕ ДАННЫЕ ПРИ UDP-FLOOD АТАКЕ

Вид данных	M	Max	Min	Fx <sup>2</sup>	D	P
tcp пакет	150,8	578	0	2,04429E-21	126	1,31495E-21
udp пакеты	815,3	2804	0	4,82346E-88	621	0,99
arp пакеты	0,3	4	0	0,5	0,9	0,8
Загрузка цпу	64,9	92	44,5	0,01	12,7	0,003

ТАБЛИЦА 2. ОБРАБОТАННЫЕ ДАННЫЕ ПРИ SYN-FLOOD АТАКЕ

Вид данных	M	Max	Min	$Fx^2$	D	P
tcp пакет	591,1	2234	58	8,20338E-25	525,8	0,99
udp пакеты	1,13	35	0	1,4639E-173	5,7	0,3
arp пакеты	0,09	4	0	0,66	0,6	0,9
Загрузка шпу	49,8	64,7	41	0,003	7,7	0,98

ТАБЛИЦА 3. ОБРАБОТАННЫЕ ДАННЫЕ ПРИ ARP-SPOOFING АТАКЕ

Вид данных	M	Max	Min	$Fx^2$	D	P
tcp пакет	133,1	676	0	7,85311E-20	155,2	2,52815E-21
udp пакеты	0,4	4	0	0,26	0,9	0,7
arp пакеты	4,3	32	0	0,003	6,95	0,99
Загрузка шпу	49,56	78	33,3	0,002	21,3	0,008

ТАБЛИЦА 4. ОБРАБОТАННЫЕ ДАННЫЕ ПРИ НОРМАЛЬНОЙ РАБОТЕ КФС

Вид данных	M	Max	Min	$Fx^2$	D	P
tcp пакет	38,75	138	4	5,74062E-12	38,72	2,38754E-18
udp пакеты	0,86	43	0	0,19	6,08	0,42
arp пакеты	0,02	1	0	0,84	0,1	0,98
Загрузка шпу	0,44	46,16	45,084	0,9	0,45	0,57

В табл. 5 указаны значения – «V», которые явно изменились при атаках.

ТАБЛИЦА 5. ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ В РАБОТЕ КФС

Вид данных	UDP-flood	SYN-flood	Arp-spoofing
tcp пакет		V	
udp пакеты	V		
arp пакеты			V
Загрузка шпу	V	V	V

## IX. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Должного внимания к вопросам безопасности каналов связи КФС мало кто придаёт значение. В результате чего злоумышленник может произвести атаки на любую часть КФС. Тестирование КФС – это сложная область исследования из-за растущей неоднородности, масштаба и сложности систем. По проделанной работе можно сделать вывод, что с помощью утилит netwox, hping3 и aircrack-ng можно реализовать множество атак, к которым уязвимы системы. А также с помощью утилит nmap можно просканировать сеть, порты устройств, протоколы передачи данных между устройствами. Из-за чего существует множество ограничений для более широкого промышленного применения КФС на реальных производствах [15] и [16].

Благодаря разработанной методики тестирования систем обнаружения атак и вторжений удалось эффективно применить ее для КФС и понять на что стоит обратить наиболее пристальное внимание при обеспечение ИБ в БПЛА

## БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю особую благодарность своему научному руководителю Басан Елене Сергеевне, доценту кафедры Безопасности информационных технологий Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, за бесценный опыт, переданный мне во время проведения научных исследований, и чуткое наставничество.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Basan E., Basan A., Grutsynin A. Overview of Information Issues for a Robotic System // In Proceedings of 19th International Conference on Communication Technology (IEEE ICCT 2019) (Xian, China). – 2019. – P. 1275-1280. – <https://www.unicode.org/notes/tn28/UTN28-PlainTextMath-v3.1.pdf> (дата обращения 22.05.2021).
2. Basan E., Basan A., Grutsynin A. Analysis of the Security Problems of Robotic Systems // 2019 2nd International Conference on Intelligent Communication and Computational Techniques (ICCT). – 2019. – P. 1200-1214. Колесников А.А. Проблемы системного синтеза: синергетическая концепция // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных работ IX Всероссийской научной конференции, Нижний Архыз, 24–27 сентября 2019 года. – Нижний Архыз, 2019. – С. 8-18.
3. Basan A., Basan E., Makarevich O. Protection System for a Group of Robots Based on the Detection of Anomalous Behavior. Advances in Intelligent Systems and Computing // in Proc. Fourth Int. Scientific Conf. "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'19), June 2020. – P. 187-197. – DOI: 10.1007/978-3-030-50097-9\_19.
4. Basan E., Basan A., Makarevich O., Babenko L. Studying the impact of active network attacks on a mobile robots group // Cybersecurity issues [Voprosy kiberbezopasnosti]. – 2019. – No. 1. – P. 35-44. – ISSN 2311-3456. – DOI: 10.21681/2311-3456-2019-1-35-44.
5. Statt Nick. Skydio's AI-Powered Autonomous R1 Drone Follows You Around in 4K // TheVerge. [Online]. – Available: <https://www.theverge.com/2018/2/13/17006010/skydio-r1-autonomous-drone-4k-video-recording-ai-computer-vision-mapping>. Accessed: February 20, 2021.
6. U.S. Department of Homeland Security, Customs and Border Protection, "CBP Air and Marine Operations Conducting Third Deployment of UAS at San Angelo," February 27, 2018. [Online]. – Available: <https://www.cbp.gov/newsroom/local-media-release/cbp-air-and-marine-operations-conducting-third-deployment-uas-san>. Accessed: February 20, 2021.
7. Basan E., Basan A., Nekrasov A. Method for detecting abnormal activity in a group of mobile robots // Sensors 2019. – 19(18):4007. – P. 1-21. – DOI: 10.3390/s19184007.
8. Javaid A., Sun W., Devabhaktuni V., Alam M. Cyber security threat analysis and modeling of an unmanned aerial vehicle system // in 2012 IEEE Conf. on Technologies for Homeland Security (HST), Nov 2012. – P. 585-590.
9. Samland F., Fruth J., Hildebrandt M., Hoppe T. AR. Drone: security threat analysis and exemplary attack to track persons // Proc. SPIE 8301, Intelligent Robots and Computer Vision XXIX: Algorithms and Techniques, 83010G (23 January 2012). – <https://doi.org/10.1117/12.902990>.
10. Keerthi C.K., Jabbar M.A. and Seetharamulu B. Cyber Physical Systems(CPS): Security Issues, Challenges and Solutions // in 2017 IEEE Int. Conf. on Computational Intelligence and Computing Research (ICCI), Coimbatore, 2017. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/ICCI.2017.8524312.
11. Mbiriki A., Katar C. and Badreddine A. Improvement of security system level in the Cyber-Physical Systems (CPS) architecture // In 2018 30th Int. Conf. on Microelectronics (ICM), Sousse, Tunisia, 2018. – P. 40-43. – DOI: 10.1109/ICM.2018.8704100.
12. Barrière M., Hankin C., Barboni A., Zizzo G., Boem F., Maffei S., Parisini T. "CPS-MT: A Real-Time Cyber-Physical System Monitoring Tool for Security Research // in IEEE 2018 24th Int. Conf. on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA), Hakodate, 2018. – P. 240-241. – DOI: 10.1109/RTCSA.2018.00040.
13. Lu T., Lin J., Zhao L., Li Y., and Peng Y. An Analysis of Cyber Physical System Security Theories // in 2014 7th Int. Conf. on Security Technology, Hainan, China, 2014. – P. 19-21. – DOI: 10.1109/SecTech.2014.12.
14. Humayed A., Lin J., Li F. and Luo B. Cyber-Physical Systems Security – A Survey // IEEE Internet of Things Journal. – 2017. – Vol. 4, No. 6. – P. 1802-1831. – DOI: 10.1109/JIOT.2017.2703172.
15. Rehman S.U., Allgaier C. and Gruhn V. Security Requirements Engineering: A Framework for Cyber-Physical Systems // in 2018 Int. Conf. on Frontiers of Information Technology (FIT), Islamabad, Pakistan, 2018. – P. 315-320. – DOI: 10.1109/FIT.2018.00062.
16. Wadsworth A., Thanoon M.I., McCurry C. and Sabatto S.Z. Development of IIoT Monitoring and Control Security Scheme for Cyber Physical Systems // in 2019 SoutheastCon, Huntsville, AL, USA, 2019. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/SoutheastCon42311.2019.9020516.

Секция IV

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ  
В УПРАВЛЕНИИ:  
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

DOI: 10.18522/syssyn-2022-36

Философия искусственного интеллекта  
в свете мировых универсалий

Непомнящий Анатолий Владимирович

Институт компьютерных технологий

и информационной безопасности

Южный федеральный университет

Таганрог, Россия

neromnyashchii@sfedu.ru

**Аннотация.** Цель работы – рассмотреть стадии развития философии, связанные с отражением в ней универсальных законов мироздания, и соответствующее их влияние на методологию создания систем искусственного интеллекта. Показано, что философские концепции научной отрасли могут относиться к различным стадиям развития философии и науки, в связи с чем возникает проблема соответствия современной философии искусственного интеллекта естественнонаучной методологии его проектирования и применения. Предложены пути решения данной проблемы.

**Abstract.** The purpose of the work is to consider the stages of philosophy development related to the reflection of the nature universal laws in it, and their corresponding influence on the methodology for the artificial intelligence systems design. It has been shown that the philosophical concepts of any science can relate to various stages of the philosophy and science development, in connection with which the problem of compliance of the artificial intelligence philosophy with the natural science methodology of its design and application arises. There are proposed ways to solve this problem.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, философия, мировые универсалии, методология, концепции.

**Keywords:** *artificial intelligence, philosophy, world universals, methodology, concepts.*

I. ВВЕДЕНИЕ

Современная западная цивилизация переживает весьма парадоксальный период своего существования. С одной стороны, наблюдается буквально взрывное развитие естественных наук, техносфера, информационно-коммуникационных технологий и их продуктов, в том числе и искусственного интеллекта, с другой – катастрофическое, более чем на столетие, отставание от этих процессов развития знания гуманитарного: интегральной антропологии, психологии, педагогики, философии...

Суть парадокса заключается в том, что современное естествознание «родилось» совсем недавно, можно сказать, с появлением «Нового Органона» Ф. Бэкона [1] (XVI в.), тогда как философия – содержащая в себе методологические основания науки, – похоже, была всегда, как это следует из культурного наследия прошлого, возраст которого исчисляется минимум десятками тысячелетий, в силу чего она и получила название «вечной философии». Другая причина такого названия заключается в том, что её положения столь совершенны, что остаются неизменными с течением веков [2], сохраняя свою актуальность и соответствие не только древним представлениям Великих Учителей о мире, но и вновь открываемым западным естествознанием мировым универсалиям – универсальным законам мироздания. Иными словами, парадокс в том, что современное естествознание обеспечивает себе эффективное развитие, продолжая исследовать положения вечной философии и используя её в качестве источника, содержащего в себе мировые универсалии. Но тогда, какой же философии следуют гуманитарные науки, чтобы обеспечить себе более чем вековое отставание от наук естественных?

Ответ на этот вопрос может быть получен путем анализа парадигм – философских и теоретических оснований естественных и гуманитарных наук, – для упрощения которого предварительно требуется рассмотреть иерархическую структуру существующего ныне человеческого знания и систему отношений между её составляющими.

II. ЗНАНИЕ И ЕГО СТРУКТУРА

Существует открытое множество определений понятия «знание», что обусловлено уникальностью актуального состояния развития ума, разума и когнитивных систем каждого конкретного человека, вследствие чего

любой фрагмент реальности (объективно регистрируемого мира форм) и, тем более, действительности в целом (не только форм, но и сознаний, управляющих этими формами), также уникально воспринимается каждым конкретным человеком и уникально обрабатывается его умом, разумом и естественным интеллектом. Именно вследствие этого у каждого конкретного человека, в его сознании появляется и фиксируется в памяти не сам исследуемый объект, а его интерпретация, своего рода теоретический образ исследуемого. Это и есть «знание» – «продукт теоретической деятельности ума» – как его определял отечественный философ В.С. Соловьев [3].

Хотя уровень развития ума, разума и когнитивных систем («очей познания [4, 5]») у каждого конкретного человека уникален, наука, для упрощения процесса передачи знания с помощью текста, прибегает к методу классификации стадий (устойчивых состояний) развития ума, разума. Одна из таких классификаций [5, 6] описывает следующие стадии развития: архаический ум (обеспечивает информационное слияние, единство с природной средой); магический ум (обретение способности управления отдельными составляющими природной среды); мифический ум (принимает идею персонифицированного бога, в качестве которого может приниматься: природное явление; более развитый человек; система производства конфессиональных, социальных и научных мифов); рациональный ум (объективизация мировосприятия – существующим признается только то, что доступно сенсорным системам); плоралистический ум (допускает, что всё сущее имеет право на жизнь); холистический ум (воспринимает мир уже как totally взаимосвязанную цельность); каузальный ум (видит причинность происходящего); недвойственный ум (отсутствует дуальность в восприятии и мышлении).

Соответственно, на различных стадиях развития ума продукт его теоретической деятельности (знание) может изменяться до неузнаваемости. Архаик может попросить западного человека не подходить к нему близко, потому что от него идет очень сильный запах металла, мешающий ему целостно воспринимать окружающий мир. В уме рационалиста металл запахом не обладает, поскольку диффузия его частиц в окружающее пространство ничтожно мала, а пахнуть, по его мнению, может только вещество, достигающее обонятельных рецепторов человека. Представление о том, что другие субстанции мира (энергия, информация, время, пространство...) тоже могут «пахнуть», у рационалиста отсутствуют, как отсутствуют и представления о существовании каких-либо других субстанций кроме вещества и энергии. И этот феномен зависимости содержания знания об одном и том же предмете исследования от состояния и стадии развития ума исследователя нельзя не учитывать.

Переходя к структуре знания и его классификации, отметим, что в уме человека, воспринимающего мир дуально (верх и низ; свет и тьма; хорошее и плохое; живое и мёртвое...), знание – тоже дуально: объективное (доступное для изучения объективными средствами (сенсорными системами и их органопроекциями) и субъективное, получаемое путём использования субъекта познания в качестве «инструмента» познания. Иными словами: эзотерическое знание – открытое для массового использования, т.е. то, что можно передать текстом и проверить

рациональным умом, и эзотерическое (тайное) знание, суть тайны которого заключается не в том, что его кто-либо скрывает, хотя и это делается для безопасности неподготовленного ума, а в том, что его, в силу многомерности, невозможно передать трёхмерными объективными средствами, в частности, – текстом. Оно может быть передано только от субъекта к субъекту путём соединения сознания передающего с сознанием принимающего, для чего первый должен иметь благо дать (Божья благодать в религиях), а второй – благо взять.

Естественно, та книжная продукция, которая продаётся издателями под рубрикой «эзотерика» на самом деле таковой не является, а представляет собой логико-дискурсивные интерпретации эзотерического знания, обретённого в процессе постижения мистического опыта мистиками от рождения (наличие предшествующего опыта в других формах бытия), адептами в специализированных религиозных школах или при освоении высших ступеней йоги, которая по сути также может быть отнесена к религиозному опыту. Именно в процессе этого опыта и постигаются мировые универсалии, которые затем интерпретируются по уму и разумению каждого. Для иллюстрации этого приведём два дуальных примера.

В прошлом веке в мир западной науки пришло высказывание Учителя Нагарджуны «Всё есть пустота». Последнее содержалось в его трудах, хранимых поколениями его учеников четыре тысячи лет. В прошлом веке хранители получили от пребывающего ныне в другой форме Учителя указание – передать знания человечеству. Труды попали в Великобританию и там стали тщательно изучаться. В результате, положение «всё есть пустота» было доказано экспериментально аппаратными средствами квантовой физики и было принято в качестве мировой универсалии. Но исследования были продолжены, и экспериментаторам в двух странах (Англии и Японии) удалось создать установки по телепортации фотонов: в одном месте пучок фотонов удалось превратить в пустоту, в другом месте удалось превратить пустоту в пучок фотонов. Это означает, что вопрос технической телепортации более сложных целностей – это только вопрос финансирования и календарного времени. Этот пример можно отнести к успешным логико-дискурсивным расшифровкам эзотерического знания.

В качестве другого примера этого процесса рассмотрим закон сохранения, который в общем виде был постигнут великим мистиком и учёным России М.В. Ломоносовым, а в тексте был затем представлен в виде словесной формулы: «ежели где-то что-то убыло, то где-то что-то прибыло».

Классическая наука интерпретировала этот закон сохранения в таком виде: «масса вещества во вселенной постоянна». Причина такой интерпретации заключалась в том, что другие субстанции мироздания доклассической и классической науке были ещё неизвестны.

Неклассическая наука обнаружила во вселенной ещё одну субстанцию – энергию, в связи с чем возникла формула А. Эйнштейна  $E=mc^2$ , что в другом виде может быть записано так:  $m+gE=\text{const}$  (где  $\text{const} = 0$ ,  $g = -1/c^2$ ,  $E$  – энергия,  $m$  – масса вещества). Из этой формулы следует новая интерпретация закона сохранения  $F(m,E) = \text{const}$ , т.е. каждый объект этого мира состоит из двух

субстанций – вещества, обладающего массой, и энергии. Эти две субстанции в мире составляют целое, характеризующееся числом, величина которого постоянна и не зависит от возможных переходов массы в энергию и наоборот.

Постнеклассическая наука приняла в качестве своей парадигмы концептуальную формулу  $F(m, E, I) = \text{const}$ , которую обосновал Т. Кун в своей работе о структуре научных революций [7]. При этом необходимо учитывать, что под информацией ( $I$ ) здесь понимается не совокупность данных, а то самое библейское «Слово» – созидающая мысль, – которая, как написано в Евангелии от Иоанна, «была у Бога и которая была Бог...». Эта формула носит именно концептуальный характер в силу того, что весь перечень субстанций, составляющих мироздание науке не известен. Поэтому и формула А. Эйнштейна  $E=mc^2$  носит частный гипотетических характер, относящийся к случаю «неподвижности» всех остальных субстанций, чего в «живой» Природе не наблюдается.

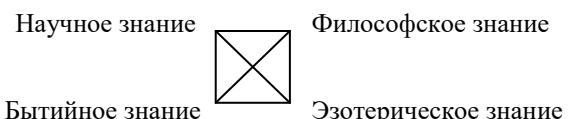
На постнеклассической стадии науки процесс интерпретаций этой мировой универсалии не остановился, и на данный момент познанный авангардом науки список субстанций, составляющих мироздание, существенно пополнился. Соответственно, концептуальная формула приняла вид:  $F(m, E, I, T, A, S) = \text{const}$ , где:  $F$  – функция;  $m$  – масса вещества;  $E$  – энергия;  $I$  – информация как субстанция;  $T$  – время как субстанция;  $A$  – эфир, как всепроникающая субстанция, имевшая в свое время, в начальном варианте таблицы Менделеева название – «всерод»,  $S$  – пространство как субстанция.

С учётом приведенных рассуждений и иллюстраций иерархия человеческого знания может быть представлена в виде следующих уровней.

- 1) Эзотерическое знание, обладающее максимальной адекватностью действительности.
- 2) Философское знание, содержащееся в «вечной» философии, представляющее собой первичную авторскую интерпретацию мистического опыта познания.
- 3) Философское знание, содержащее в себе прочие интерпретации, но уже не самого мистического опыта, а его авторской интерпретации.
- 4) Проблемно-ориентированное философское знание, содержащее в себе концептуальные основания той или иной стадии развития науки или отдельной научной отрасли.
5. Общенаучное знание, содержащее в себе общенаучную парадигму, вытекающую из её аксиоматику и методологические основания науки, в целом, имеющие трансдисциплинарный характер, т.е. предназначенные для использования методологическим основанием всех без исключения наук и отдельных научных отраслей [8].
- 6) Конкретно-научное знание, содержащее в себе проблемно-ориентированные интерпретации общенаучного знания, его парадигмы, аксиоматики и методологических оснований.
- 7) Бытийное знание, содержащее в себе доступные для массового использования интерпретации знания более высоких уровней. Таковыми, в частности, являются

существующие в веках поговорки, выступающие социальными регуляторами обеспечения безопасности жизнедеятельности народов, например: бытийная интерпретация причинно-процессно-следственного закона (закона кармы, действия), входящего в перечь мировых универсалий, – «что посеешь, то и пожнёшь»; «Самый лучший способ оставаться в глупцах – считать себя умнее других» (де Ларош Фуко) – бытийная интерпретация принципа иерархии в мироустройстве и т.п.

Структурная модель взаимоотношений различных видов знания показана на Рис. 1.



*Rис. 1. Виды знаний и их взаимосвязи*

Из приведенной иерархии знания и структуры его взаимосвязей следует неизбежная необходимость соблюдения принципа иерархии (как мировой универсалии), который согласно своему названию «иерархия» предполагает управление сверху. То есть нижестоящие виды знания должны соответствовать смысловым значениям, парадигмам и аксиоматике знаний вышестоящих. Таким образом, все виды знаний должны быть согласованы с «вечной» философией как с источником первичных авторских интерпретаций субъективного опыта мистиков, апробированного и подтверждённого веками. Это и является исходным положением для анализа причин отставания гуманитарного знания.

### III. ОТОБРАЖЕНИЕ ФИЛОСОФИИ В КЛАССИЧЕСКОЙ И СОВРЕМЕННОЙ НАУКЕ

До появления современного института науки, следуя вечной философии и будучи её адептом, Аристотель учил, что самым универсальным инструментом познания (органоном) является человеческий ум [9]. А процесс познания любого объекта познания заключается в отождествлении человеком своего ума с объектом познания. К этому же призывали и Л.Н. Толстой и Г. Гегель, и многие другие философы далёкого и совсем близкого прошлого. Этот Органон Аристотеля в современной постнеклассической науке называется субъективным способом познания – познания путем отождествления субъекта познания с объектом познания и имеет своим результатом многомерное интегральное знание, доступное на приведенных высших стадиях развития человеческого ума и разума: холистической, каузальной и недвойственной.

Однако, читая соответствующие труды Аристотеля [9], сам Органон можно даже не заметить, поскольку основной упор в них сделан на науке логики, т.е. на проблеме донесения результата субъективного познания до других, этим Органоном не владеющих, т.е. на герменевтике – искусстве словесного выражения мысли. В этом и заключается рассмотренная выше проблема передачи результатов субъективного опыта – ни теоретически, ни практически нерешаемая проблема однозначного описания бесконечного (мысли) конечными средствами (текстом). Для её решения Аристотель рассматривал дихотомическую логику (да или нет) и логи-

ку, которая впоследствии была открыта заново и названа квантовой логикой – да, нет, может быть, – для разъяснения которой и была придумана история с котом Шрёдингера.

Эта проблема интерпретаций субъективного опыта и спровоцировала появление Нового Органона Ф. Бэкона, объективного способа познания – познания с помощью объективных средств вспоможения. Применение этого способа дало возможность получить не истину как таковую, а её отображение в реальности, в мире форм, так называемую объективную истину, доступную для наблюдения сенсорными системами человека «оком тела» и обработки с помощью «ока разума», позволяющего видеть смысл в семантических системах и текстах [4, 5]. Так возникла объективная классическая наука, которая позволила ускорить развитие в человеке рационального мышления, т.е. естественного интеллекта, но для своего становления и развития потребовала от человечества большой жертвы – закрытия «ока души» и «ока духа» и, как следствие, признания всего, что недоступно для сенсорного восприятия, не существующим в природе. Это противоречило основным постулатам «вечной» философии, и Ф. Бэкон в своём «Новом органоне» призвал от неё отказаться за ненадобностью, дабы народ не тратил напрасно время на бесполезные размышления, не приносящие никакого объективно регистрируемого результата, например в виде материальных благ [1].

В оправдание столь жёстких действий по отношению к «вечной» философии классическая наука объявила своей парадигмой закон сохранения массы, гласящий, что масса вещества во вселенной постоянна. В такой трактовке этому закону и придали статус мировой универсалии, что не позволяло в рамках классической науки рассматривать проблему существования в мироздании других субстанций, кроме вещества.

В поддержку главенства классической науки и её парадигмы, в плане замещения «вечной» философии, была создана материалистическая философия, которая выдвинула ряд поддерживающих классическую науку постулатов, главными из которых явились следующие.

1) Материя есть то, что нам даётся в ощущениях – провозгласил диалектический материализм. Поскольку радиосигналы, слава Богу, не даются нам в ощущениях, они, стало быть, не материальны.

2) Жизнь – есть форма существования белковых тел, существенным моментом которого является постоянный обмен веществ с окружающей их внешней природой, причём с прекращением этого обмена веществ прекращается и **жизнь**, что приводит к разложению белка». [10]

3) Человекечен во времени и в пространстве и представляет собой всё ту же белково-нуклеиновую форму жизни. Его белковое тело является субстратом (производителем) психики, а сознание – есть функция мозга [10, 11].

4) Бытие определяет сознание (всё тот же К. Маркс). Этот постулат является логическим продолжением первых трёх и противоречит не только вечной философии, но и библейским текстам, в которых утверждается, что Бог создал человека по образу и подобию своему, т.е. – творцом, определяющим своё бытие.

5) То, что нематериально, то идеально, т.е. существует не на самом деле, а только в человеческом мозге в процессе его функционирования. Таким способом на инакомыслящих философов навесили ярлык идеалистов, рассуждающих о несуществующем.

Во времена становления классической науки в целом эти постулаты были приняты и классической гуманистической наукой в качестве общего аксиоматического базиса её методологии. Но классическая наука и её методологические основания в естественнонаучных отраслях прекратили своё существование более ста лет назад, чего наука гуманистическая не заметила, в силу своей привязанности к достигнутому, и не без помощи политиков, желающих править вечно [12]. Именно поэтому гуманистические науки удерживаются и поныне в «клетке» мифов классической науки, опираясь на давно уже неадекватных современному уровню науки методологические основания. Это и служит причиной столь значительного отставания гуманистических наук от наук естественных и, одновременно, показывает мифический уровень сознания тех приверженцев классики, которых и учёными то теперь назвать трудно.

#### IV. ФИЛОСОФИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Искусственный интеллект является продуктом постнеклассической науки, поэтому его философские основания, по дихотомической логике, не могут не соответствовать ряду мировых универсалий, образующих основу постнеклассической методологии – методологии интегрального видения [4–6]. Эти универсалии следующие.

1) Принцип иерархии мироустройства, уже упомянутый выше.

2) Второе начало термодинамики (гуманистическая интерпретация: «неуправляемые материальные системы стремятся к хаосу»), доказывающее существование Создателя всего сущего.

3) Принцип тотальной взаимосвязи всего сущего, фактически являющийся следствием принципа иерархии, второго начала термодинамики и теоремы Бэла о нелокальности квантовых эффектов.

4) Принцип тринитарности в мироздании (закон третьей силы), говорящий о том, что во вселенной невозможно организовать закрытое взаимодействие двух особей без участия в этом взаимодействии третьей силы. Принцип тринитарности отображается практически во всех сферах бытия, политики, науки, философии, эзотерики [13]. Несколько примеров тринитарных структур, редукция которых даже до диады приводит к системному краху: модель человека в вечной философии «тело – душа – дух»; структуры управления социальными системами – «экономика – политика – нравственность», «правда – закон – справедливость», «проект – кадры – ресурсы»; структуры отображения деятельности – «текст – образ – символ», «прошлое – настоящее – будущее», «наблюдаемое – наблюдение – наблюдатель», «знание – опыт – понимание», «причина – процесс – следствие»; наконец библейское – «Бог отец – Бог Сын – Бог Дух Святой». Смысл понятия третьей силы в этом законе заключается в том, что в тринитарной структуре каждая составляющая является регулятором отношений между двумя остальными. Перестроеч-

ное крушение российской государственности было успешным и скоротечным только потому, что острое атаки было направлено на убийство нравственности народа [14]. После того как эта задача Западом была решена, западно-ориентированная экономика быстро «купила» политику, и суверенность России (свобода воли в принятии решений) перестала существовать, что было зафиксировано в статье 13 так называемой ельцинской конституции, которая на самом деле писалась западными спецслужбами.

5) Принцип экологической этики [6]: каждая особь имеет право на сохранение своей целостности и две обязанности: сохранять целостность особей, входящих в её структуру и сохранять целостность особей, в которые она входит в качестве составляющей.

6) Причинно-следственный закон: любое действие любой особи (мысль, слово или поступок) неизбежно вызывает адекватное следствие, направленное на эту особь как на источник причинности. Что посеешь, то и пожнёшь.

7) Закон сохранения кроме уже рассмотренных интерпретаций имеет ещё одну, важность которой трудно переоценить: «нельзя ничего взять, не отдав что-либо взамен». Как говорил мистик И.В. Джугашвили (Сталин): «На каждый подарок должен быть отдарок!». Именно поэтому, всё что ему дарили, он отдавал в музей, а сам жил очень скромно. Если бы хитрецы, а «хитрость – есть проявление недоразвитого ума» [15], смогли понять эту универсалию в мире исчезли бы немедленно такие социальные пороки, как коррупция, воровство, насилие и безнравственность в целом. Но по невежеству своему многие, следуя мифам классической науки, думают, что жизнь только одна, платить ни за что не придётся, поэтому и идут на все тяжкие.

Перечень мировых универсалий, естественно, не исчерпывается приведенным списком, но его вполне достаточно, чтобы понять современную философию искусственного интеллекта, а точнее говоря, философию тех, кто его активно внедряет в бытие современного человека. Она не следует дихотомической логике, свойственной классической науке. Ей присущи более перспективные для опережающего развития искусственного интеллекта логические построения (квантовая логика, нечёткая логика, логика эвристик и т.п.), позволяющие обосновать любые отклонения от того, что принято называть вечной философией и здравым смыслом.

Эта философия проблемно- и практико-ориентированная, т.е. для достижения конкретной цели используются положения той стадии развития философии, которая позволяет обосновать для потребителя справедливость принятых управленцами решений и выбранного пути достижения поставленной цели. Для иллюстрации этого факта приведем несколько ключевых примеров.

30 мая 2019 г. во время посещения школы №21 Сбербанка Президент России В.В. Путин провёл Совещание по вопросам развития технологий в области искусственного интеллекта, где им, в частности, было сказано: «Уже говорил и хочу ещё раз повторить: если кто-то сможет обеспечить монополию в сфере искусственного интеллекта, – ну последствия нам всем понятны – тот станет властелином мира» [16]. Против этого

ничего нельзя возразить, и участие России в этой гонке представляется неизбежным уже потому, что, как говорили мудрые, «познанный враг – уже наполовину побеждённый враг». Если враг невидим, поражение неизбежно. Если страна будет в позиции аутсайдера в области искусственного интеллекта, она будет всегда проигрывать в информационных операциях и войнах. А поскольку информационное оружие в настоящее время является оружием первого приоритета, такие поражения обязательно приведут к потере её суверенности.

Таким образом, в этом контексте, разработка и внедрение искусственного интеллекта подпадает под действие философии выживания, одним из главных постулатов которой является – «цель оправдывает средства» [17 и др.], что мы и наблюдаем в процессах ускорения цифровизации всего и вся, большинству участников которых неизвестны не только мировые универсалии, но и сама «вечная» философия.

Но в философии выживания есть достаточно серьёзный изъян, который можно выяснить с помощью другой интерпретации её приведенного положения «главное на пожаре тушить то, что горит». Никто против этого не возражает, но параллельно крайне желательны превентивные меры по недопущению других пожаров, иначе всю жизнь только и будем тушить пожары, которые легко и радостно организуют те, кто с большим усердием изучают вечную философию в своих корыстных целях. Для иллюстрации этого рассмотрим ситуацию, касающуюся использования именно философского знания.

С утратой Тибетом своей суверенности многие тибетские учёные (ламы), и даже далай-лама, покинули Тибет. В СССР в период этой миграции (1959 г. и последующие) за отклонения от материалистической философии можно было потерять свободу, а США предоставили тибетцам все условия для проживания и обучения американцев теории и практики вечной философии. В результате в США открылось множество школ трансперсональной (надличностной) психологии и для публикации исследований в этой области был организован выпуск более ста научных журналов, которые в СССР были под запретом. В итоге США более чем на два поколения опередили СССР в области подготовки «операторов напряжённых служб» и особенно в области внешней разведки. Этот «пожар» Россия тушит до сих пор, а западные спецслужбы, естественно, в это время не спят и не стоят на месте, они активно развиваются дальше в познании себя и мира. Таких примеров множество.

Возвращаясь к упомянутому совещанию, обратим внимание на речь второго выступающего – Г. Грефа, – который, говоря о направлениях развития искусственного интеллекта, сказал следующее: «Второе направление – это разработка программных и технологических решений. Мы тоже здесь поставили достаточно амбициозные и ясные цели. Сказали, что мы хотим разработать решения, которые могут обеспечить превосходство над человеком по специальным задачам. И к 2030 году мы должны обеспечить превосходство человека по широкому кругу задач» [16].

Это высказывание не соответствует ни одной из приведенных мировых универсалий. Оно соответствует мифическому складу ума, поскольку основано на мифах

классической науки о человеке, и на философии идолопоклонства. Последнее вытекает из игнорирования докладчиком, возможно умышленно, опыта «наших заокеанских партнёров» с проектом «Стратегической обороны инициативы» (СОИ). А суть этого проекта была именно в порочной идеи возможного превосходства искусственного интеллекта над человеком в принятии решений о нанесении удара по противнику в случае возникшего подозрения о начале им ядерной атаки. Уже первые эксперименты в рамках проекта СОИ показали, что объективные данные, какими бы большими они не были, – это даже не половина правды (истины), а её нижняя часть, и на её основе принимать стратегические решения могут только фаталисты.

Пыл западных идолопоклонников, пытавшихся реализовать, похоже привнесенную извне, идею вознесения инструмента (ИИ), созданного рациональным человеческим умом, на пьедестал всемогущего персонифицированного бога, быстро угас, когда им напомнили о существовании оружия возмездия, которое находится в перманентной боевой готовности и не в одной стране. Суть этого оружия заключается в уничтожении земной цивилизации страной, потерпевшей поражение в ядерной войне, средствами последовательно произведенных, с расчётыми интервалами, ядерными взрывами на суше или в океане. И для этой операции достаточно дюжины боеголовок, тогда как в каждой из продвинутых ядерных держав их накоплен не один десяток тысяч.

В итоге рассмотрения приведенного высказывания можно, конечно, предположить, что у его автора есть проблемы с герменевтикой, а по сему он ошибочно применил понятие «человек» там, где должно было быть использовано понятие «личность». Это несколько смягчило бы постановку вопроса, но не избавляет автора от необходимости понимания того, что искусственный интеллект в современном его состоянии – есть модель человеческого ума мифической и рациональной стадий развития. Чтобы подняться над этим уровнем ИИ должен включить в себя средства управления мыслью, поскольку даже плюралистическое сознание уже требует от человека и его личности опыта осознанности ноосферных феноменов человеческого сознания, недоступных для инструментальных технических средств, систем и сетей любого уровня сложности. Искусственный интеллект может обрабатывать информацию только в виде данных, тогда как человек, обладающий надрациональным умом, может оперировать информацией как субстанцией созидающей, бесконечной по мерности – мыслью.

Следовательно, остаётся вопрос: «А каким же путем и на каких философских основаниях собираются инициаторы преобладающего над человеком развития ИИ обеспечить к 2030 году превосходство над человеком по широкому кругу задач, если в контексте мировых универсалий это теоретически невозможно?

Ответ лежит на поверхности: поскольку вечная философия, постнеклассическая парадигма науки и её аксиоматика даже для постановки такой задачи неприемлемы, в ход идёт материалистическая философия времён классической науки и философия удержания власти по принципу «разделяй и властвуй», содержащемуся в труде Н. Макиавелли «Государь» [17]. Об этом кстати и

упомянутый докладчик не один раз говорил на международных форумах, что народу нельзя давать хорошее образование, поскольку тогда им трудно будет управлять. Это всё ставит на свои места, и это уже давно не секрет и звучит с самых высоких трибун как программа расчеловечения современной цивилизации и превращения людей в обслуживающий персонал [18]. А поскольку такого роботизированного персонала много не требуется, население земли планируется сократить до 500 млн. человек, что было зафиксировано на «скрижалях Джорджии» на пяти языках. Всех остальных заменит искусственный интеллект под лозунгом повышения благосостояния граждан.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги ещё раз подчеркнём, что сам по себе искусственный интеллект, являясь инструментом в руках человека, не несёт в себе ни добра, ни зла, как и все остальные инструменты – от простого скальпеля хирурга, до так называемого «общего искусственного интеллекта». Те же, кто ставит инструмент над человеком и присваивает ему способность философствовать, – либо невежды, либо очень сильно лукавят, что относится ко многим западным и отечественным, с позволения сказать, философам, стоящим на службе у тех, кто мечтает вечно разделять и властвовать. Именно они утверждают вопреки всем мировым универсалиям, что Бог это всего лишь иллюзия [19], а мозг, а стало быть, и его модели, обладают собственной философией и этикой [20], что и является проекцией философии идолопоклонства, как продукта мифического сознания и классической науки.

В условиях прогрессирующего развития технических информационных средств управления, опережающего развитие индивидуального и коллективного сознания человека, каждый человек, желающий сохраниться в будущем в виде и с сознанием человеческим должен прилагать все усилия, чтобы познать себя, получить интегральное образование средствами самообразования и обеспечить свое осознаваемое развитие. Важность самопознания столь велика, что после прихода к власти нацистов в германии было создано более пятидесяти исследовательских институтов по интегральному изучению человека. Сейчас в открытом доступе можно познакомиться с трудами Мюнхенского психологического института, из которых совершенно очевидно, что целью деятельности института было освоение тайного знания и способов его применения для самоуправления и управления другими.

Страна, ставящая своей целью сохранение суверенности, неизбежно должна обеспечивать приоритет методологии интегрального видения во всех своих учебных заведениях всех образовательных уровней. Промедление в деле гуманизации образования, особенно инженерного, смерти подобно, поскольку тотальный рост невежества в мире, который фиксируют учёные многих экономически развитых стран, – это тот самый «пожар», который при промедлении уже, может быть, некому будет тушить.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую признательность всем, кто участвовал в становлении и развитии системы интеграции технического и гуманитарного знаний в системе подготовки инженеров в ТРТУ и принимал активное участие в её работе, а также всем тем, кто и ныне содействует её возрождению.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бэкон Ф. Сочинения. в 2-х т. Т. 2. – М.: Мысль, 1978. – 575 с.
2. Хаксли О. Вечная философия. – М.: АСТ, 2014. (Новая философия).
3. Философский словарь Владимира Соловьёва. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Феникс». 1997. – 464 с.
4. Уилбер К. Очи познания: плоть, разум, созерцание: пер. с англ. Е. Пустошкина. – М.: РИПОЛ классик, 2016. – 464 с. (Интегральный мир).
5. Уилбер К. Око духа: Интегральное видение для слегка свихнувшегося мира: пер. с англ. В. Самойлова / под ред. А. Киселева. – М.: ООО «Издательство АСТ» и др., 2002. – 476. [4] с. (Тексты трансперсональной психологии).
6. Уилбер К. Краткая история всего: пер. с англ. С.В. Зубкова. – М.: АСТ: Астрель, 2006.- 476 [4] с.: ил.
7. Kuhn T.S. The Structure of Scientific Revolutions. Chicago, 1962; М., 1975
8. Jantsch E. "Interdisciplinarity. Problems of Teaching and Research in Universities", Paris, CERI-OECD, 1972.
9. Аристотель. Сочинения в четырёх томах. Т. 2. Ред. З.И. Микеладзе. – М.: Мысль, 1978. – 687 с.
10. Маркс К., Энгельс Ф. Анти-Дюринг, переворот в науке, произведенный г. Евгением Дюрингом. Сочинения. – М.: Государственное социально-экономическое издательство, 1931. – Т. 14.
11. Чуприкова Н.И. Психика и сознание как функция мозга. – М.: Наука, 1985. – 200 с.
12. Выступление В.В. Жириновского Фрагмент №7 стенограммы заседания Государственной Думы 17 октября 2012 г.
13. Баранцев Р.Г. Понятия – Образы – Символы. Источник: <http://www.trinitas.ru/rus/doc/0019/d01/00190005.htm> 21.09.2022.
14. Вдовин А.И. «План Даллеса», «золотой миллиард» и российские либералы-космополиты. – Электронный ресурс <https://www.politpros.com/journal/read/?ID=1353&journal=96> 21.09.2022.
15. Гендель М. Космоконцепция розенкрайцеров или мистическое христианство. – М.: Литан. 2004. – 560 с.
16. Совещание по вопросам развития технологий в области искусственного интеллекта, 30 мая 2019 г. во время посещения школы 21 Сбербанка. <http://kremlin.ru/events/president/news/60630> 10 августа 2022 г.
17. Макиавелли Н. Государь: пер. Муравьёва Г. – Изд-во АСТ, 2020. – 256 с. (Изключительная книга мудрости).
18. Выступление директора Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» Михаила Валентиновича Ковальчука на заседании СФ. 17 октября 2012 г. [https://www.youtube.com/watch?v=PgBq7oOI8Hk&ab\\_channel=%D0%A1%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D1%82%D0%A4%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8](https://www.youtube.com/watch?v=PgBq7oOI8Hk&ab_channel=%D0%A1%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D1%82%D0%A4%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8) 21.09.2022.
19. Докинз Ричард. Бог как иллюзия. – Изд-во: КоЛибри, 2008. – 560 с.
20. Gazzaniga M.S. The ethical brain. — Chicago: Chicago University Press, 2005. – 226 p.

# Концепция проекта по созданию распределенной сети полигонов для отработки сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях

**Коргин Николай Андреевич**  
Институт проблем управления  
им. В.А.Трапезникова РАН  
Москва , Россия  
*nikolay@korgin.ru*

**Мещеряков Роман Валерьевич**  
Институт проблем управления  
им. В.А.Трапезникова РАН  
Москва , Россия  
*mrv@ieee.org*

**Аннотация.** В статье обосновывается актуальность исследований по отработке сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях для решения задач обеспечения проведения полевых исследований в интересах научных организаций и эксплуатации приборной базы уникальных научных установок. Предлагается оригинальная концепция к реализации в форме сети распределенных полигонов с описыванием примеров модельных и натурных испытаний, позволяющих объединить разрозненные подходы к испытаниям.

**Abstract.** The problem of developing scenarios for the use of heterogeneous groups of vehicles with an electric drive in difficult climatic and landscape conditions to solve the problems of ensuring field research in the interests of scientific organizations and the operation of the instrument base of unique scientific installations is introduced. An original concept is proposed for implementation in the form of a network of distributed test sites with a description of examples of model and full-scale tests that make it possible to combine disparate approaches to testing.

**Ключевые слова:** электротранспорт, групповое управление, организационно-техническая система, центр коллективного пользования.

**Keywords:** electric transport, group control, organizational and technical system, shared use center.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Проблемы управления распределенными организационно-техническими системами, образуемыми гетерогенными группами подвижных объектов, различающихся по степени автономности, набору решаемых задач, среде передвижения и инфраструктурой обеспечения их функционирования – являются крайне актуальными в области теории управления техническими системами.

При внедрении конкретных технических решений на основе полученных фундаментальных теоретических результатов актуальными являются задачи создания

экспериментальных платформ для отработки внедряемых решений и среды для их апробации – в т.ч., натурных полигонов, позволяющих реализовывать планируемые сценарии применения разрабатываемых технических решений в реалистичных условиях. При этом последняя из выделенных задач может требовать значительных капитальных вложений, включая вложения не только в приборную базу для оценки результатов полевых испытаний, но и в инфраструктуру базирования и обслуживания опытных платформ для апробации технических решений.

В настоящей работе описывается концепция проекта по созданию распределенной сети полигонов для отработки сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом на основе существующей материально-технической базы и научно-технической инфраструктуры организаций Российской академии наук, расположенных в регионах со сложным климатическими и ландшафтными условиями, включая инфраструктуру обслуживания уникальных приборных установок, как центров коллективного пользования (ЦКП) объектами экспериментально-стендовой и полигонной базы, которую предлагается использовать для решения задач экспериментальной проверки решений по управления распределенными организационно-техническими системами, образуемыми гетерогенными группами подвижных объектов.

Проект предлагается инициировать по результатам серии полевых испытаний опытных платформ малогабаритного транспортного средства повышенной необходимости на электроприводе, предназначенного для передвижения по снежному покрову (рис. 1), разрабатываемых специалистами ИПУ РАН при взаимодействии с отечественными промышленными партнерами в географических локациях размещения объектов инфраструктуры КБНЦ РАН, КНЦ РАН и САО РАН со сложными климатическими и ландшафтными условиями – в высокогорных районах Кавказа и горных регионах Заполярья.



Рис. 1. Группа опытных платформ малогабаритного транспортного средства повышенной проходимости на электроприводе, предназначенного для передвижения по снежному покрову

Задача формирования среды для апробации экспериментальных платформ при отработке внедряемых решений, в т.ч., натурных полигонов, позволяющих реализовывать планируемые сценарии применения разрабатываемых технических решений в реалистичных условиях, является крайне важной по двум причинам.

Во-первых – это «традиционный» путь апробации разрабатываемых решений в технических науках.

Во-вторых – это позволяет сформулировать и решать задачу «цифровизации» реальной физической среды и сценариев функционирования разрабатываемых технических систем с целью дальнейшего применения собранных данных на этапах имитационного, компьютерного моделирования и создания моделей «цифровых двойников» не только самих разрабатываемых решений, но и окружающей среды. При этом следует заметить, что до сих пор в этом направлении многие задачи, как, например, построение адекватных цифровых моделей снежного покрова для произвольного рельефа при моделировании движения транспортных средств, остаются открытыми и слабоформализуемыми. Что возвращает нас к актуальности традиционного пути апробации – натурных испытаний технических систем на натурных полигонах.

При этом необходимо учесть, что уникальность и дорогоизна многих решений для экспериментально-стендовой и полигонной базы делает крайне актуальным вопрос их повторного использования или вопрос о возможности применения научной инфраструктуры, разработанной ранее, для решения задач иного профиля.

Научная новизна предлагаемого проекта обуславливается следующим рядом факторов.

Во-первых, акцент делается на подвижных объектах на электрических приводах, гетерогенных по формам и стандартам хранения и восполнения запаса электроэнергии, причем предполагается их функционирование в условиях разной степени автономности с точки зрения возможности доступа к источникам восполнения электроэнергии. Кроме того, крайне важным остается гетерогенность групп по степени автономности: например, движение наземных транспортных средств с ручным управлением и при взаимодействии с автономными беспилотными летательными аппаратами.

Во-вторых, акцент делается на труднодоступных регионах, где уже существует научная инфраструктура указанных научных организаций – Кабардино-балкарского научного центра (КБНЦ) РАН, Кольского научного центра (КНЦ) РАН и Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН.

Само по себе сочетание проблемы управления гетерогенными группами подвижных объектах на электрических приводах и труднодоступности регионов функционирования обуславливает один из аспектов научной новизны исследований.

В-третьих, для САО РАН и естественно-научных подразделений КНЦ и КБНЦ РАН предлагаемый проект подразумевает новый взгляд на решение «традиционных» задач обеспечения проведения полевых исследований в интересах научных организаций и эксплуатации приборной базы уникальных научных установок.

## II. АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

«Бум» электрификации транспортных средств (ЭТС), наблюдаемый повсеместно, порождает целый ряд вызовов и возможностей не только в рамках традиционных парадигм использования транспортных средств, но и формируя принципиально новые направления. В качестве примера можно перечислить такие явления как балансировка электрических сетей за счет парка электромобилей, см., например [1], значительное ускорение внедрения бизнес модели «мобильность как сервис» (MaaS) [2] и социально-экономический конфликт, связанные с развитием слабо регулируемой ниши легких транспортных средств, таких как электро-самокаты [3]. В развивающейся в настоящее время концепции «Электрического интернета» электрический транспорт выступает одновременно в роли потребителя, накопителя и транспортировщика электроэнергии [4]. При этом, объективные технологические ограничения, такие как время зарядки аккумуляторных батарей порождают такие технологические задачи как сопоставление стратегий заряда батарей на борту ЭТС и замены данных батарей [5], а объективные возможности, как то наличие значительных электрических мощностей и возможность их восполнения в процессе движения ЭТС – порождают такие технологические задачи как проектирование и внедрение электрических подвесок [6], что в свою очередь позволяет обеспечивать управляемость и проходимость ЭТС на принципиально другом уровне, чем в ТС с ДВС.

Отдельным направлением развития ЭТС является легкий внедорожный транспорт массой 50-500 кг, не предназначенный для движения по дорогам общего пользования (мотоциклы, квадроциклы, багги, снегоходы и т.п.). При этом, ТС с ДВС указанного класса, как считается, оказывают достаточно значительное влияние на экологию окружающей среды [7, 8].

Много внимания в исследованиях уделяется проблеме оценки совместного воздействия распределенных энергоресурсов (РЭР) на энергосистему, которые могут быть развернуты в системах распределения коммунальных услуг, путем анализа расширения генерации, передачи и распределения и затрат, связанных с внедрением РЭР [9], включая проблему ограниченности скорости восполнения

энергии [10] и исследования для труднодоступных или северных регионов [11–14], таки и отдельных инфраструктурных объектов [15] или предприятий [16].

Перевода фокус внимания на проблему функционирования гетерогенных групп подвижных транспортных средств, следует отметить, что крайне актуальной для дальнейшей апробации в натурных условиях является тематика функционирования как гетерогенных групп мобильных роботов [17–20], так и колаборативное взаимодействие на уровне человек – автономное транспортное средство [21] и в формате смешанных групп [22–23].

В заключение обзора актуальных направлений исследований хочется вернуться к организационному аспекту проблемы, на решение которой направлен проект – проблеме повышения эффективности использования научной инфраструктуры при проведении научных исследований посредство реализации парадигмы центров коллективного пользования, к исследованию которой также предлагаются формальные подходы с позиции теории управления [24].

### III. КОНЦЕПЦИЯ ПРОЕКТА

#### A. Предлагаемый подход

Нами предполагается сформулировать тематику исследований по отработке сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях для решения задач обеспечения проведения полевых исследований в интересах научных организаций и эксплуатации приборной базы уникальных научных установок.

На основе анализа существующей инфраструктуры научных организаций, проводимых ими фундаментальных исследований, существующих опытных транспортных платформ и демонстраторов технологий предлагается сформулировать концепцию распределенной сети полигонов как центров коллективного пользования, сформулировать требования к построению формальных моделей управления данной структурой как распределенной организационно-технической структурой, сформулировать план исследований по апробации и анализу подходов к управлению распределенными организационно-техническими системами на примере решения задач обеспечения проведения полевых исследований в интересах научных организаций и эксплуатации приборной базы уникальных научных установок.

В рамках реализации проекта, со стороны ИПУ РАН предполагается:

- 1) формирование концепции распределенной сети полигонов как центров коллективного пользования на базе существующей инфраструктуры научных организаций;
- 2) формирование реестра предлагаемых к использованию опытных транспортных платформ и демонстраторов технологий ИПУ РАН и технологий фиксации результатов эксперимента;
- 3) формирование реестра целесообразных к пилотной апробации подходов к управлению распределенными организационно-техническими системами.

Со стороны САО РАН предполагается:

- 1) формирование реестра сценариев применения гетерогенных транспортных систем для решения задачи обслуживания приборной базы уникальных научных установок;
- 2) анализ возможностей материально-технической базы САО РАН для решения задач обеспечения полевых испытаний группировок транспортных средств на электрическом приводе и допустимых режим ее использования с учетом требования решения основных научных задач.

Со стороны КНЦ РАН предполагается:

- 1) формирование информационной модели распределенной сети полигонов;
- 2) формирование реестра сценариев применения гетерогенных транспортных систем для решения задач обеспечения проведения полевых исследований в интересах научных организаций естественно-научного профиля КНЦ РАН;
- 3) Анализ возможностей материально-технической базы КНЦ РАН для решения задач обеспечения полевых испытаний группировок транспортных средств на электрическом приводе и допустимых режим ее использования с учетом требования решения основных научных задач.

С стороны КБНЦ РАН предполагается:

- 1) формирование реестра предлагаемых к использованию опытных транспортных платформ и демонстраторов технологий КБНЦ РАН и технологий фиксации результатов эксперимента;
- 2) формирование реестра сценариев применения гетерогенных транспортных систем для решения задач обеспечения проведения полевых исследований в интересах научных организаций естественно-научного профиля КБНЦ РАН;
- 3) анализ возможностей материально-технической базы КБНЦ РАН для решения задач обеспечения полевых испытаний группировок транспортных средств на электрическом приводе и допустимых режим ее использования с учетом требования решения основных научных задач.

В рамках разработки концепции распределенной сети полигонов как центров коллективного пользования на базе существующей инфраструктуры научных организаций, предполагается построение ее информационную модель и формирование реестров:

- 1) опытных транспортных платформ и демонстраторов технологий и технологий фиксации результатов эксперимента;
- 2) сценариев применения гетерогенных транспортных систем.

Планируется провести анализ возможностей материально-технической базы задействованных организаций для решения задач обеспечения полевых испытаний группировок транспортных средств на электрическом приводе и допустимых режим ее использования.

Предполагается, что эскизная концепция распределенной сети полигонов как центров коллективного пользования на базе существующей инфраструктуры научных организаций будет формироваться на основе следующей структуры информационной модели:

a. Отдельный полигон:

- i. объекты материально-технической базы;
- ii. локальные сценарии для апробации;
- iii. ограничения по режиму использования.

b. Перемещаемый объект:

- i. опытная транспортная платформа;
- ii. объект транспортной инфраструктуры;
- iii. объект измерительной инфраструктуры.

c. Общие сценарии применения распределенной сети полигонов для апробации и демонстрации решения задач обеспечения проведения полевых исследований в интересах научных организаций и эксплуатации приборной базы уникальных научных установок посредством применения гетерогенных группировок транспортных средств.

В качестве пилотной группы гетерогенных транспортных средств предлагается рассмотреть сочетания из нескольких легких транспортных средств, передвигающихся по снежному покрову и БПЛА различной грузоподъёмности, осуществляющих задачи навигации, регистрации движения и ретрансляции информации в интересах всей группы ТС. В качестве пилотного предполагается проанализировать и сформулировать сценарий применения группы гетерогенных транспортных средств для работы по одному (нескольким) направлениям:

- 1) обслуживание инфраструктуры БТА в зимний период;
- 2) мониторинг состояния ледового покрова г. Эльбрус;
- 3) оценка воздействия антропогенного фактора на особо охраняемые природные территории.

*B. Имеющийся задел*

Как уже упоминалось, проект инициируется специалистами ИПУ РАН, на территории которого уже активно задействуется как полигон для отработки задач группового управления автономными и квазиавтономными группами транспортных средств, см, например, [25]. Кроме того, под эгидой полигона осуществляется стратегическое взаимодействие с промышленным партнерами в сфере разработки, апробации и внедрения интеллектуальных технологий управления силовыми установками транспортных средств с электрическим приводом.

При этом, несмотря на очевидный технический акцент всего проекта, значительную роль в нем будет играть проблема согласования интересов в процессе формирования перечисленных в предыдущем разделе реестров. От ИПУ РАН в проекте принимают участие известные специалисты в области проблем согласования интересов в организационно-технических системах [26, 27]. Именно наработки, полученные ими в рамках применения разработанной «технологии активного планирования», в т.ч. в применении для решения задач согласования

интересов в энергетических системах [28] предполагается положить в основу модели согласования интересов участников распределенной сети полигонов.

Также в рамках настоящего проекта, предполагается продолжить исследования, проводившиеся в рамках проекта РНФ «Арктический дизайн: методы технической эстетики в освоении и развитии территорий Российской Севера», в ходе которых отрабатывался перспективный облик опытной платформы малогабаритного транспортного средства повышенной проходимости на электроприводе, предназначенного для передвижения по снежному покрову, рассматривая данный тип транспортных средств, как один из типов объектов гетерогенных групп, переведя акцент на проблему согласования интересов в проектах развития инфраструктуры, обеспечивающей функционирование легкого внедорожного электротранспорта [29].

Участники проекта со стороны КНЦ РАН имеет значительный научный задел в области построения информационных систем управления региональным развитием [30, 31], включая концепцию Центра перспективных исследований и обеспечения безопасности Арктики [32], реализующей, в числе прочего, идеологию инфраструктуры как сервиса (IAAS), которая предполагается ключевой в рамках реализации предполагаемого проекта. Их научный задел предполагается реализовать при построении информационной модели распределенной сети полигонов.

В течении 2020 и 2021 гг. под эгидой КНЦ РАН специалистами ИПУ РАН в рамках проекта РНФ «Арктический дизайн: методы технической эстетики в освоении и развитии территорий Российской Севера» проводилась оценка возможностей применения легких электрических снегоходов для решения задач оленеводческих хозяйств на территории Кольского полуострова (см. рис. 2.).



Рис. 2. Работа с оленеводческими хозяйствами

Участники проекта со стороны САО РАН обладают большим опытом в области эксплуатации уникальных научных установок, поставок и анализе задач технического обеспечения выполнения научных исследований, см, например [33, 34], на который предполагается опираться в ходе работ по формированию сценариев для полевых испытаний.

В течении 2021 г. на базе инфраструктуры САО РАН уже была проведена апробация применения группы опытных транспортных платформ для решения отдельных задач обслуживания инфраструктуры БТА, см. рис. 3.



Рис. 3. Специалисты САО РАН проводят аппробацию прототипов легких электрических снегоходов в рамках решения задач по обслуживанию инфраструктуры БТА

Участники проекта со стороны КБНЦ РАН, научной задел этой организации, как по вопросам высокого уровня проектирования мобильных робототехнических систем [35], в областях разработки и проектирования отдельных средств управления [36], средств позиционирования [37], так и самих транспортных платформ [38], предполагается задействовать в проекте.

В течении 2021 г. специалистами ИПУ РАН и КБНЦ РАН были осуществлены тестовые заезды опытных транспортных платформ на склонах г. Эльбрус (рис. 4.).



Рис. 4. Пример отображения характеристик расхода электрической энергии на 3D карте местности

В ходе испытаний производилась оценка энергозатрат для перемещения по ледниковым полям в условиях высокогорья. На рис. 5 представлены относительные профили потребления мощности (максимум 15 киловатт) и тока (до 200 Ампер), в зависимости от высоты (перепад 3485-4622 м) и крутизны склона.

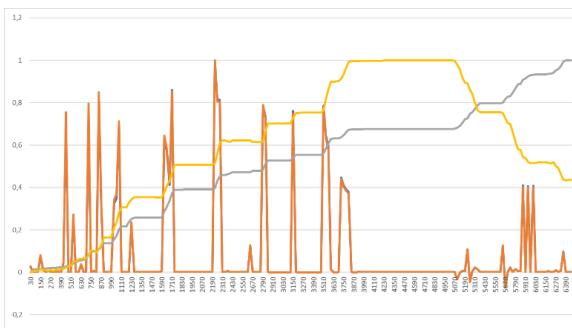


Рис. 5. Пример результатов измерений совместных характеристик движения и расхода электрической энергии

В заключение следует отметить, что реализация проекта в дальнейшем позволит обеспечить условия для развития подходов к оценке возможного повышения энергоэффективности и минимизации воздействия на окружающую среду при эксплуатации элементами научно-технической инфраструктуры и приборной базы уникальных научных установок за счет применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом для обеспечения проведения полевых исследований в интересах научных организаций и эксплуатации приборной базы уникальных научных установок обеспечения.

Кроме того, проведение экспериментов на базе опытных платформ малогабаритного транспортного средства повышенной проходимости на электроприводе, предназначенного для передвижения по снежному покрову, позволит оценить перспективность применения подобных решений для повышения степени транспортной доступности и связности в регионах Арктической зоны высокогорных регионах Российской Федерации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gunkel P.A. et al. From passive to active: Flexibility from electric vehicles in the context of transmission system development // Applied Energy. – 2020. – Vol. 277. – P. 115526.
2. Brezovec P.; Hampl N. Electric Vehicles Ready for Breakthrough in MaaS? Consumer Adoption of E-Car Sharing and E-Scooter Sharing as a Part of Mobility-as-a-Service (MaaS) // Energies. – 2021. – Vol. 14. – P. 1088.
3. Paulsson A., Sørensen C.H. (ed.). Shaping smart mobility futures: Governance and policy instruments in times of sustainability transitions. – Emerald Publishing Limited, 2020.
4. Joseph A., Balachandra P. Energy internet, the future electricity system: Over-view, concept, model structure, and mechanism // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 16. – P. 4242.
5. Christensen L. et al. The recharging infrastructure needs for long distance travel by electric vehicles: a comparison of battery-switching and quick-charging stations // Spatial Analysis and Location Modeling in Urban and Regional Systems. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2018. – P. 341-361.
6. Long G. et al. Regenerative active suspension system with residual energy for in-wheel motor driven electric vehicle // Applied Energy. – 2020. – Vol. 260. – P. 114180.
7. Xiao X. et al. Winter tourism and climate change: Exploring local and non-local snowmobilers' perceptions of climate change and adaptation behaviors // Journal of Outdoor Recreation and Tourism. – 2020. – Vol. 31. – P. 100299.
8. Diakov A.S., Pozdeev A.V., Novikov V.V. The main directions of the development of snowmobiles in the Russian Federation // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Vol. 224. – P. 02080.
9. Carvalho J.P. et al. A framework to measure the technical, economic, and rate impacts of distributed solar, electric vehicles, and storage // Applied Energy. – 2021. – Vol. 297. – P. 117160.
10. Alsabagh A., Wu B., Ma C. Distributed electric vehicles charging management considering time anxiety and customer behaviors // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2020. – Vol. 17, No. 4. – P. 2422-2431.
11. Lajunen A. Evaluation of energy consumption and carbon dioxide emissions for electric vehicles in Nordic climate conditions // 2018 Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). – IEEE, 2018. – P. 1-7.
12. Bartlett F.M. Turbulent Climate Discourses in Northern Sweden // Anthropology Matters. – 2020. – Vol. 20, No. 1. – P. 10-42.
13. Воробьев И.С., Воротников А.М. Коммерческий транспорт как драйвер декарбонизации российской арктики // Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. – 2021. – №. 1. – С. 59-63.

14. Благовидова Н.Г. Проблемы взаимодействия антропогенных и природных экосистем Арктики // Наука, образование и экспериментальное проектирование: Труды МАРХИ. – 2018. – С. 379-382.
15. Dyberg F., Shwenkér Fröjdholm N. Energy Mapping of Ekebyhov Ski Resort. – 2021.
16. Szymanski J., Zurek-Mortka M. Industrial Scenario of Renewable Energy-Based Electromobility // Advanced Energy and Control Systems. – Springer, Singapore, 2022. – Р. 3-15.
17. Кензин М.Ю., Бычков И.В., Максимкин Н.Н. Координация группы мобильных роботов при осуществлении комплексного мониторинга большой продолжительности // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. – 2019. – С. 2351-2356.
18. Васильев И.А. Управление группировкой спасательных роботов для работы в природно-климатических условиях Арктики // АРКТИКА. – 2017.
19. Рожнов А.В., Лобанов И.А. К вопросу формализованного описания общего семантического поля смешанных робототехнических группировок // В научном издании представлены материалы Десятой международной научно-технической конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016)» по следующим направлениям:• Проблемы управления развитием крупномасштабных систем, включая ТНК, Госхолдинги и Госкорпорации. – 2017. – С. 368.
20. Диане С.А.К., Легович Ю.С., Русаков К.Д. Интеграция современных технологий обработки информации и управления для решения задач патрулирования территории с применением гетерогенных автономных робототехнических комплексов // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2018. – 2018. – С. 216-222.
21. Jose N. et al. Design and analysis of human assisting electric all-terrain vehicle // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2021. – Vol. 2341, No. 1. – Р. 020029.
22. Галин Р.Р., Мещеряков Р.В. Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration // Studies in Systems, Decision and Control. – 2020. – Vol 272. – Р. 55-63.
23. Галин Р.Р., Широкий А.А., Магид Е.А., Мещеряков Р.В., Мамченко М.В. Effective Functioning of a Mixed Heterogeneous Team in a Collaborative Robotic System // Informatics and Automation. – 2021. – Vol. 20, No. 6. – Р. 1224-1253.
24. Ключков В.В., Чернер Н.В. Центры коллективного пользования в прикладной авиационной науке: эффективность и направления развития //Финансовая аналитика: проблемы и решения. – 2015. – №. 42 (276). – С. 2-17.
25. Кутахов В.П., Мещеряков Р.В. Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка задачи применения технологий искусственного интеллекта // Проблемы управления. – 2022. – №. 1. – С. 67-74.
26. Бурков В.Н., Еналеев А.К., Коргин Н.А. Согласованность и неманипулируемость механизмов организационного управления: текущее состояние проблемы, ретроспектива, перспективы развития теоретических исследований // Автоматика и телемеханика. – 2021. – №. 7. – С. 5-37.
27. Churkin A. et al. Review of Cooperative Game Theory applications in power system expansion planning // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 145. – Р. 111056.
28. Churkin A. et al. Enhancing the Stability of Coalitions in Cross-Border Transmission Expansion Planning // IEEE Transactions on Power Systems. – 2021.
29. Коргин Н.А., Кравчук С.Г., Сергеев В.А. Проблемы согласования интересов в проектах развития инфраструктуры, обеспечивающей функционирование легкого внедорожного электротранспорта // Материалы 14-й Мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2021, Дивноморское, Геленджик). – Таганрог: ЮФУ, 2021. – Т. 2. – С. 155-157.
30. Маслобоев А.В. Внутриуровневая и межуровневая согласованность в многоуровневых распределенных системах управления региональной безопасностью // Экономика. Информатика. – 2021. – Т. 48, № 2. – С. 360-375. DOI: 10.52575/2687-0932-2021-48-2-360-375.
31. Маслобоев А.В. Технология моделирования и интегральной оценки показателей региональной безопасности // Информационно-технологический вестник. – 2020. -№ 1 (23). – С. 127-139.
32. Маслобоев А.В. Концепция Центра перспективных исследований и обеспечения безопасности Арктики // Арктика: экология и экономика. – 2019. – № 2 (34). – С. 129-143.
33. Верич Ю.Б. и др. Вспомогательные устройства спектрографа высокого разрешения БТА (функции и управление) // Научные труды Института астрономии РАН. – 2020. – Т. 5, №. 6. – С. 320-321.
34. Панчук В.Е. и др. О развитии астрономических наблюдений с высоким спектральным разрешением //Системный синтез и прикладная синергетика. – 2019. – С. 166-169.
35. Нагоев З.В. и др. Автономный синтез пространственных онтологий в системе принятия решений мобильного робота на основе самоорганизации мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2020. – №. 6 (98). – С. 68-79.
36. Нагоев З.В., Сундуков З.А., Денисенко В.А. Мобильный пункт управления роботизированными рабочими платформами. – 2020. (патент).
37. Бжихатлов К.Ч., Абазиков М.А., Унагасов А.А. программа для сбора данных с датчика глубины. – 2022. (патент).
38. Ошхунов М.М. и др. Модели оценки экстремальных нагрузок интегрированных виртуальных прототипов мобильных одноосных роботов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2015. – №. 1. – С. 50-54.

# Основные концептуальные решения по структуре цифровых двойников объектов газотранспортной системы

Кирилов Альберт Эрнестович

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет,  
Пермь, Россия,

A.E.Kirilov@yandex.ru

Черный Константин Анатольевич

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет,  
Пермь, Россия,

chernyy\_k@mail.ru

**Аннотация.** В статье исследуется структура цифрового двойника производственного объекта, которая основана на концепции, утвержденной Координационным комитетом по комплексной автоматизации производственных и технологических процессов для метрологического обеспечения и коммуникаций ПАО «Газпром». Определены типичные задачи, решаемые с использованием цифровых двойников производственных объектов, и эффекты от их внедрения. Проведен SWOT-анализ преимуществ, недостатков, возможностей и негативных факторов цифровой трансформации производственных объектов. Образ будущих промышленных систем с использованием цифровых двойников в промышленности. Информативная часть статьи дополнена пояснительными схемами и рисунками.

**Abstract.** The article studies the structure of the digital twin of a production facility, which is based on the concept approved by the Coordinating Committee for Integrated Automation of Production and Technological Processes for Metrological Support and Communications of PJSC “Gazprom”. Typical tasks solved using digital twins of production facilities and the effects of their implementation are determined. A SWOT-analysis of advantages, disadvantages, opportunities, and negative factors in the digital transformation of production facilities is carried out. An image of future industrial systems using the digital twins in the industrial. The informative part of the article is supplemented with explanatory diagrams and drawings.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, цифровая трансформация, производственный объект, киберфизические системы, промышленная аналитика, искусственный интеллект, газотранспортные системы.

**Keywords:** digital twin, digital transformation, production facility, cyber-physical systems, industrial analytics, artificial intelligence, gas transportation systems.

С первого января 2020 года в России введен в действие предварительный национальный стандарт РФ [1], в котором определены основополагающие принципы построения цифровых двойников производства и представлено определение понятия «цифровой двойник» – программно-аппаратный комплекс, реализующий динамическую модель для исследования и управления деятельностью социотехнической системы. Можно это событие рассматривать в качестве связующего звена между науч-

ными разработками в сфере цифровой трансформации промышленных объектов и систем и их применение в производственной практике.

Годом ранее на VIII Международной конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» в своем докладе генеральный директор ООО «Газпром ВНИИГАЗ» М. Ю. Недзвецким обозначил следующие основные направления цифровой трансформации газотранспортной системы (ГТС) России [2]: 1) разработка и внедрение цифровых двойников; 2) совершенствование систем хранения информации; 3) разработка и внедрение интеллектуальных систем технического диагностирования и контроля. Из всех перечисленных направлений разработка и внедрение цифровых двойников является одним из превалирующих поскольку позволяет значительно усовершенствовать подходы к эксплуатации технологического объекта на основе моделирования его состояний (как в будущем, так и прошлом), учитывая все многообразие влияющих на состояние объекта факторов, чего в реальных условиях добиться практически невозможно.

В различных источниках «цифровой двойник» определяют как технологию, которая находится на стыке цифровой и физической реальности и при этом развивается на фоне конвергенции целого ряда новых перспективных технологий, таких как искусственный интеллект, «интернет вещей», «дополненная реальность», «большие данные», «умное производство» и др. В Концепции реализации технологий цифровых двойников «Группы Газпром» (далее, Концепция «Группы Газпром») под цифровыми двойниками понимаются «...информационные модели производственных процессов единой системы газоснабжения, позволяющие оптимизировать производственные процессы и сбалансировано управлять производственными активами за счет использования инструментов мониторинга, оценки и прогнозирования технического состояния производственных объектов, сценарного моделирования инженерно-технических, производственно-эксплуатационных и технико-экономических показателей производственно-технологических комплексов. В основе цифровых двойников лежат инновационные технологии искусственного интеллекта (нейронные сети и другие методы) и высокопроизводительные вычисления» [3].

На рис. 1 представлена структура цифрового двойника производственного объекта ГТС на основе Концепции «Группы Газпром» [4].



Рис. 1. Структура цифрового двойника производственного объекта ГТС

В ее основу включены: 1) подсистема данных о техногенных событиях 1–4 уровней (материалы технического расследования, статистические данные, материалы проверок государственного и ведомственного надзора и меры, предпринимаемые организацией); 2) подсистема проектно-конструкторской и исполнительной документации (документация по строительству, капитальному ремонту, реконструкции, модернизации и перевооружению); 3) подсистема нормативно-справочной информации (действующие нормативные правовые акты и нормативно-технические документы, в том числе и локальные нормативные документы организации, эксплуатирующей производственный объект); 4) подсистема инженерных данных (технические характеристики объекта в виде паспортных данных, эксплуатационных параметров, данных, полученных в ходе диагностических обследований, предельно-допустимых параметров технологического оборудования и др.); 5) подсистема сведений о персонале производственного объекта (характеристики персонала, сведения о подготовке и обучении персонала по вопросам эксплуатации оборудования, данные о подготовке и обучении мерам безопасности, результаты аттестации); 6) подсистема интерактивного обучения и подготовки персонала (алгоритмы обучения персонала технике обслуживания технических устройств, мероприятиям по локализации и ликвидации аварий, мерам безопасности в интерактивном режиме); 7) подсистема графического отображения (3D и 2D изображения производственного объекта, технических устройств, технологические схемы, конструкторские и архитектурные модели, топологические схемы и т.п.); 8) подсистема отображения информации в режиме реального времени (массивы данных о параметрах функционирования, необходимых для определения состояния производственного объекта, режима работы технических устройств, действий персонала, осуществляющего управление технологическим процессом); 9) подсистема имитационно-математических моделей (высокопроизводительные алгоритмы, сочетающие в себе технологии искусственного интеллекта, основанные на имитационно-математических моделях, описывающие техногенные события, разрушение технических устройств, образование поражающих факторов, эвакуацию персонала, оперативные действия персонала по локализации техногенных событий); 10) подсистема виртуаль-

ных испытаний (программные алгоритмы, реализующие моделирование процессов и явлений, свойственных реальному производственному объекту на основе математических моделей и поступающей информации).

Техническая оснастка ЦД может быть реализована на основе технологической сети передачи данных. Один из возможных вариантов технической оснастки представлен на рис. 2. В соответствии со схемой (рис. 2) основой локальной сети служит сервер, который обеспечивает при помощи программного обеспечения хранение и аппаратно-вычислительную обработку информации, поступающей от рабочих станций (рабочих мест специалистов) и контроллеров автоматизированных систем управления и регулирования, осуществляющих управление технологическими процессами на производственном объекте. Вывод информации о ЦД осуществляется на стационарные и мобильные рабочие станции.

Функционирование ЦД осуществляется следующим образом. От физического объекта (персонал объекта, автоматизированные системы управления технологическим процессом, системы противопожарной защиты, автоматизированные метеорологические станции, информационно-управляющие системы организации, электронные базы данных и др.) к ЦД поступают данные о текущих параметрах его жизненного цикла (технологические параметры, эксплуатационная и служебная информация, метеоданные, данные об отказах, ремонтах и т.п.).

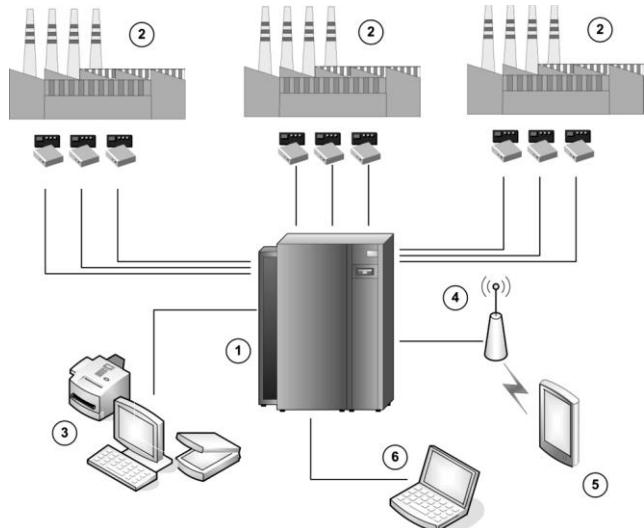


Рис. 2. Принципиальная схема технической оснастки ЦД:  
1 – сервер; 2 – технологические объекты; 3, 5, 6 – рабочие станции (стационарные и мобильные); 4 – оборудование для беспроводного подключения мобильных рабочих станций

Этот же принцип реализован в качестве базовой концепции ЦД (рис. 3).

Исходя из обозначенного принципа организацией, эксплуатирующей производственный объект, с помощью ЦД могут быть решены следующие задачи:

- Анализ надежности технических устройств, прогнозирование их отказов.** Решение данной задачи осуществляется посредством высокопроизводительных вычислений с функциями искусственного интеллекта, основанных на современных имитационно-математических моделях надежности, в которых учитываются вышеиз-

званные данные о функционировании оборудования и действия персонала. Кроме того, учитывается влияние на объект действия сотрудников различных уровней управления (работников рабочих профессий, операторов, специалистов, руководителей). Для выполнения такой задачи могут быть применены методы и средства тестирования, позволяющие определить уровень компетентности персонала.

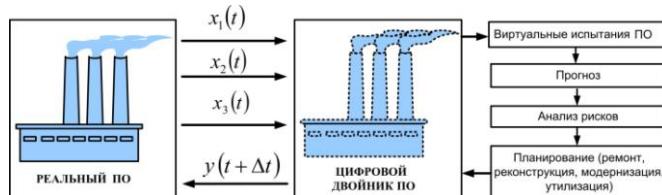


Рис. 3. Базовая концепция ЦД:

$x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $x_3(t)$  – информация о реальном объекте в текущий момент времени;  $y(t+\Delta t)$  – корректирующее воздействие на функционирование производственного объекта (ПО), устанавливающее его наиболее оптимальные и безопасные условия эксплуатации

**2. Планирование ремонтных работ и оптимизация затрат на эксплуатацию технических устройств, применяемых на производственном объекте.** Вычислительные операции такой задачи осуществляются с целью сохранения работоспособности технических устройств путем планирования среднего и капитального ремонтов, диагностических обследований, технических освидетельствований и других мероприятий. При этом реализация в ЦД данной задачи тесно связана с первой, поскольку определение межремонтного интервала, а также объема ремонтных и других работ осуществляется на основе оценки надежности технических устройств.

**3. Оценка риска возникновения аварий в реальном времени в зависимости от поступающей в ЦД информации.** Реализация данной задачи осуществляется в нескольких направлениях: 1) выбор наиболее вероятного сценария аварии; 2) определение величины и прогнозирование уровня воздействия поражающих факторов аварии и ее последствий (осколочное поражение, взрывная ударная волна, термическое поражение, воздействие искр и пламени, недостаток кислорода, снижение видимости в дыму, токсичность опасных веществ, токсичность продуктов горения и др.) на персонал объекта, на компоненты, на имущество третьих лиц, на природную среду с учетом специфики сценария аварии; 3) определение наиболее безопасного варианта эвакуации персонала и имущества из опасной зоны; 4) определение наиболее результативного и эффективного варианта ликвидации аварии и ее последствий, с проведением оценок не только финансовых, технических и иных ресурсов организации, но и индивидуальных особенностей поведения персонала объекта, в том числе и персонала оперативных подразделений (стрессоустойчивость, степень готовности к риску, скорость принятия решений, скорость реакций, порог активности и другие психофизиологические и психофизические характеристики).

**4. Архивирование и хранение информации о ЦД.** Данная задача позволяет накапливать информацию о ЦД и осуществлять ее хранение. Это проектная, конструкторская, исполнительская, эксплуатационная документация в электронном формате (оперативные журналы с

эксплуатационными характеристиками, производственные инструкции, заводские паспорта и руководства по эксплуатации, технологические регламенты и другие документы, необходимость которых установлена нормативными требованиями), результаты проверок представителями государственного и ведомственного надзора (акты обследования и предписания, планы мероприятий по устранению нарушений, материалы, подтверждающие факт устранения нарушений), материалы технического расследования техногенных событий 1–3 уровней, нормативно-техническая информация.

Главным эффектом от внедрения ЦД является повышение надежности технических устройств, применяемых на производственном объекте, заблаговременное предупреждение аварийных ситуаций и связанного с ними ущерба.

Следует отметить, что несмотря на отмеченные выше достоинства применения ЦД, организация может столкнуться с определенными проблемами при реализации ЦД. Структурированные в виде SWOT-матрицы преимущества и недостатки от внедрения ЦД с учетом данных работы [2] представлены в табл. 1. Приведенные результаты SWOT-анализа не являются исчерпывающими и могут изменяться в зависимости от специфики и особенностей конкретного производственного объекта. Кроме того, при практическом применении должны быть учтены и развитие нормативной базы в сфере цифровизации, и развитие методов технико-экономического обоснования применения ЦД.

ТАБЛИЦА 1. SWOT-анализ внедрения цифрового двойника производственного объекта

Сильные стороны	Слабые стороны
Повышение надежности технических устройств, применяемых на производственном объекте, на основе прогнозного моделирования их жизненного цикла в условиях воздействия различных факторов (виртуальные испытания). Заблаговременное предупреждение аварий на производственном объекте и связанного с ними ущерба на основе моделирования различных вариаций его жизненного цикла	Сложность реализации ЦД, связанная с изменением производственных процессов (проектирование, экспертиза, монтаж, пуско-наладка, подготовка обслуживающего персонала). Значительные финансовые затраты на создание, внедрение и эксплуатацию ЦД. Недостаточная развитость рынка услуг по созданию и внедрению ЦД. Недостаточность охвата и детализации в нормативном регулировании процессов цифровой трансформации объектов экономики. Необходимость нормативных правовых и нормативно-технических изменений в сфере промышленной безопасности
Возможности	Угрозы
Снижение затрат на эксплуатацию производственного объекта. Повышение производительности труда. Повышение качества выпускаемой продукции. Технологическое преимущество в конкурентной среде. Преимущество на рынке услуг	Цифровой протекционизм. Сокращение рабочих мест и перераспределение рынка труда. Технологическая сложность ЦД, которая может приводить к его отказам. Сложность разработки адекватных математических моделей и их алгоритмизации. Кибератаки

Таким образом, цифровой двойник – это инструмент, дающий возможность заглянуть в будущее реального объекта, копией которого он является, и выбрать наиболее оптимальные «эксплуатационные маршруты». Одна-

ко это только самая скромная ожидаемая перспектива. Принимая в расчет основное преимущество искусственного интеллекта перед другими автоматизированными принципами управления производством, мы подразумеваем также такое автоматизированное управление производством, когда организационно-технические аспекты безаварийной работы предприятий возлагаются на искусственный разум. Еще двадцать лет назад такой ход технологического процесса показался бы больше фантастикой, чем реальностью, но сегодня, при имеющихся инновационных технологиях искусственного интеллекта, это четкая, утвержденная программа производственных преобразований.

Следует также отметить, что в настоящее время разработать и реализовать в производственной деятельности полноценный цифровой двойник производственного объекта под силу только крупным компаниям – мировым лидерам, обладающим достаточными для этого ресурсами. Однако к середине столетия, учитывая тенденцию развития цифровых технологий, возможность внедрения в производственный процесс киберфизического разумного компонента сможет осуществить и рядовая организация, эксплуатирующая котельную, трансформаторную подстанцию или газораспределительную сеть. Возможно уже в текущем столетии цифровой двойник станет одним из разделов проектной документации на строительство или реконструкцию производственного объекта, а любое техническое устройство будет иметь свою цифро-

вую копию, с возможностью интеграции в структуру ЦД любой программно-технологической компоновки. И это далеко не весь набор новшеств, которые могут ожидать промышленные системы в будущем ведь каждый шаг инновационного технологического преобразования способен создать веер новых идей, изобретений и разработок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ПНСТ – 429-2020. Умное производство. Двойники цифровые производства. Ч. 1. Общие положения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200174728> (дата обращения 05.12.2021).
2. Евсеев С.В., Пиляев Р.Н. VIII Международная конференция «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 11. – С. 91-94.
3. Кирилов А.Э., Черный К.А., Тагиров А.И., Хасanova Ф.Н. К вопросу о структуре цифровых двойников опасных производственных объектов // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 3. – С. 33-40. – DOI: 10.24000/0409-2961-2022-3-33-40.
4. Семенов П.В., Семишкур Р.П., Дяченко И.А. Концептуальная модель реализации технологии «Цифровых двойников» для предприятий нефтегазового комплекса // Газовая промышленность. – 2019. – № 7 (787). – С. 24-30.
5. Полянин А.В., Головнина Т.А. Концепция управления инновационной деятельностью промышленных систем на основе технологий цифрового двойника // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. – 2021. – № 5 (14). – С. 7-23. – DOI: 10.18721/JE.14501.

# Разработка среды для тестирования системы управления транспортными потоками

Елькин Дмитрий Максимович

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*delkin@sfedu.ru*

Лихтин Семён Сергеевич

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*lihtin@sfedu.ru*

Кондратов Вадим Сергеевич

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*kondratov@sfedu.ru*

**Аннотация.** Оценка эффективности систем управления транспортными потоками перед их непосредственным применением является важным этапом в процессе разработки и внедрения подобных систем. В работе рассмотрена среда для тестирования систем управления транспортными потоками на базе макета участка дорожной сети, состоящего из четырех перекрёстков. Тестовая среда позволяет применять различные параметры управления к транспортному потоку в зависимости от задач.

**Abstract.** Evaluation of the effectiveness of traffic management systems before their direct application is an important step in the development and implementation of such systems. The paper considers an environment for testing traffic flow management systems based on a layout of a road network section consisting of four intersections. The test environment allows you to apply different control options to the transport stream, depending on the tasks.

**Ключевые слова:** управление транспортными потоками, распределённая система, IEC 61499, тестовая среда.

**Keywords:** traffic management, distributed system, IEC 61499, testing environment.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Эффективность работы систем управления транспортными потоками (ТП) реализованных на базе существующих метод можно оценить на основе имитационного моделирования или исследования реальной дорожной сети после внедрения системы управления движением.

В ходе анализа исследований [1–6], было выявлено, что в зависимости от параметров оцениваемой модели управления выделяются следующие критерии:

- общая задержка автомобиля, которая представляется собой разность времени между проездом транспортного средства по исследуемому маршруту без задержек и с задержками, меньше – лучше;
- количество остановок – сумма остановок, которые вынуждено было совершить транспортное средство при движении по исследуемому маршруту, меньше – лучше;

- время поездки – общее время, которое затратило транспортное средство при движении по исследуемому маршруту, меньше – лучше;
- средняя задержка автомобиля – усредненная разность времени между проездом транспортного средства по исследуемому маршруту без задержек и с задержками, меньше – лучше;
- пропускная способность дорожной сети – общее количество транспортных средств, которое может проехать по исследуемому маршруту за определённый промежуток времени, больше – лучше;
- скорость потока – средняя скорость транспортных средств при проезде через исследуемый участок дорожной сети, больше – лучше;
- длина очереди – количество транспортных средств, ожидающих проезда в точке задержки на участке дорожной сети, меньше – лучше.

Значения представленных критериев могут изменяться в зависимости от транспортных и геометрических характеристик исследуемого участка улично-дорожной сети. Таким образом, сложившейся практикой стала проверка эффективности предлагаемых решений на основе сравнения с эталоном. Например, сравнивают предлагаемую систему управления исследуемым участком улично-дорожной сети со стандартным светофорным регулированием с жестким циклом, если предлагаемая система показала лучшие показатели по заданным критериям, она считается более эффективной.

Также стоит выделить два критерия – общая задержка автомобиля и пропускная способность дорожной сети, которые в полной мере могут охарактеризовать транспортную ситуацию на исследуемом участке дорожной сети и используются в большинстве работ [7–13] демонстрирующих эффективность предлагаемых подходов к управлению ТП.

## II. МАКЕТ ИССЛЕДУЕМОГО УЧАСТКА ДОРОЖНОЙ СЕТИ

Для проведения тестирования системы управления движением, которая была разработана с помощью метода построения распределенных систем управления на основе событийно связанных автоматных моделей [14], был разработан макет участка улично-дорожной сети в

масштабе 1:400 (рис. 1 и 2). Макет состоит из четырёх раздельных перекрёстков, которые могут быть соединены по одной или по двум сторонам с другим транспортным пересечением.

Перекрёсток J1 – Т-образный перекрёсток, содержащий по две полосы для движения на каждом из направлений.

Перекрёсток J2 – является крестообразным, так же, как и перекрёсток J1 содержит по две полосы для движения в каждом из направлений.

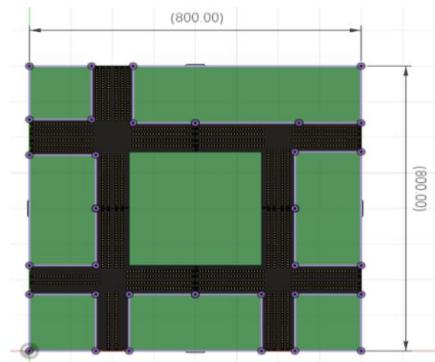


Рис. 1. Изображение макета

Перекрёсток J3 – крестообразный, в западном и южном направлениях содержит по три полосы для движения транспорта, а в северном и восточном по две полосы для движения в каждом из направлений.

Перекрёсток J4 – крестообразный в западном и северном направлениях содержит по две полосы для движения транспорта, а в южном и восточном по одной полосе для движения транспорта в каждом из направлений.

Все перекрёстки характеризуются высокой интенсивностью движения транспорта и транспортной загруженностью, в идеальных условиях моделирования без внешних управляющих воздействий на дорожную сеть, пропускная способность участка дорожной сети составляет 14 000 ед./ч.

Для перекрёстка J1 транспортная загруженность составляет 2000–2500 ед./ч.

Для перекрёстка J2 транспортная загруженность составляет 3000–3500 ед./ч.

Для перекрёстка J3 транспортная загруженность составляет 3000–3500 ед./ч.

Для перекрёстка J4 транспортная загруженность составляет 4000–4500 ед./ч.



Рис. 2. 3D модель макета

Для визуализации автомобилей и их движения была использована светодиодная лента с адресными светодиодами WS2812b с плотностью 144 светодиода на метр (рис. 3). В масштабах макета один светодиод равен одному автомобилю длиной 3 метра.

Для формирования ТП на макете, был использован микрокомпьютер Raspberry PI 3B и программа на языке программирования Python, которая имитирует движение транспортного потока по модели следования за лидером.

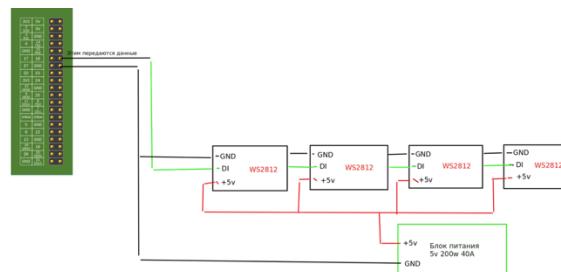


Рис. 3. Схема подключения

### III. ТЕСТОВАЯ СРЕДА

Среда для тестирования системы управления транспортными потоками (рисунок 4), состоит из:

- Приложения в программном обеспечении NXTstudio;
- Сервера на языке программирования Python;
- Макета участка улично-дорожной сети из четырёх перекрёстков.

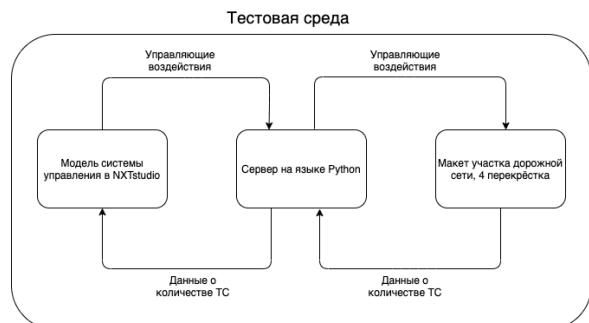


Рис. 4. Схема работы тестового стенда

Система управления дорожным движением которая представлена в виде приложения NXTstudio получает информацию о транспортной загруженности подконтрольного участка улично-дорожной сети от макета участка дорожной сети по протоколу TCP/IP с помощью сервера на Python в виде массива данных: «</n<sub>1</sub>\*/\*n<sub>2</sub>\*...» где n – количество автомобилей на полосе.

Затем агенты обрабатывают полученные данные и формируют управляющие воздействия на ТП, которые передаются на макет участка дорожной сети с помощью Python сервера в виде массива данных:

“/An<sub>1</sub>:c\*/An<sub>2</sub>:c\*/...\*” где An – номер агента, c – цвет сигнала светофора для полосы подконтрольной агенту.

#### IV. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Была проведена серия из пяти тестовых испытаний для крестообразного перекрёстка, состоящего из 10 входящих полос для движения и участка дорожной сети, состоящего из четырех перекрёстков различного типа (рис. 5). Движение транспорта осуществлялось со следующими параметрами: без управления (движение по знакам приоритета), с жестким управлением, с адаптивным управлением на основе разработанной системы. Длительность каждого из тестовых испытаний составляла 3600 секунд.

Для тестовых испытаний без управления (движение по знакам приоритета) использовалась схема организации движения, где приоритет – знак главной дороги, отдавался направлениям с наибольшей загруженностью транспортом.

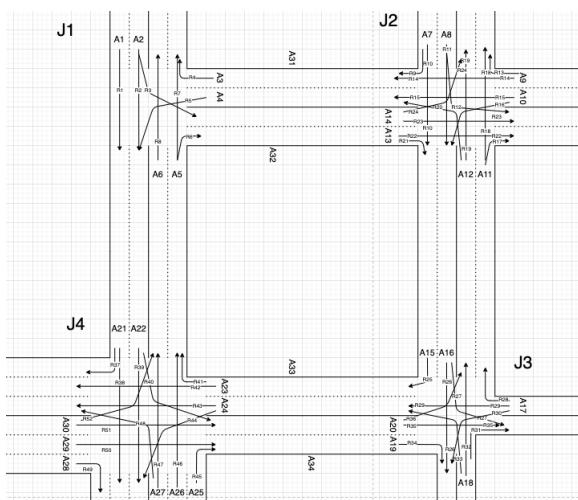


Рис. 5. Исследуемый участок дорожной сети

Для тестовых испытаний с жестким управлением расчет светофорных циклов для транспортных пересечений производился на основе методических рекомендаций по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах

Во время проведения тестовых испытаний эффективность организации движения оценивалась по следующим параметрам: количество транспортных средств, проехавших транспортное пересечение (пропускная способность) и сумма задержек транспорта при движении через транспортное пересечение.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты сравнения разработанной на основе предлагаемого метода системы адаптивного многоагентного управления и режимов формирования управляющих воздействий на перекрёсток – «без управления» и «жесткое управление», можно представить в виде табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

	Без управления	Жесткое управление	Адаптивное многоагентное управление
Перекрёсток	2159 авт./ч. 1379 с.	2508 авт./ч. 1020 с.	2939 авт./ч. 577 с.
Участок дорожной сети	10654 авт./ч. 3185 с.	10021 авт./ч. 3851 с.	11788 авт./ч. 1991 с.

Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод что на тестовом стенде исследуемого участка улично-дорожной сети, применение системы с адаптивным распределенным управлением, даёт лучшие результаты чем режимы «без управления» и «жесткое управление».

#### ЛИТЕРАТУРА

- Leontiadis Ilias, et al. On the effectiveness of an opportunistic traffic management system for vehicular networks // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2011. – Vol. 12. – P. 1537-1548.
- Wang Y., et al. A review of the self-adaptive traffic signal control system based on future traffic environment [Electronic resource] // Journal of Advanced Transportation. – 2018. – Vol. 1. – URL: <https://doi.org/10.1155/2018/1096123> (date of the application: 25.09.2021).
- Gordon R.L., Tighe W. Traffic Control Systems Handbook (2005 Edition). – No. FHWA-HOP-06-006. – 2005. – 369 p.
- Papageorgiou M., et al. Review of road traffic control strategies // Proceedings of the IEEE. – 2003. – Vol. 91. – P. 2043-2067.
- Hunt P.B., et al. SCOOT—a traffic responsive method of coordinating signals. – No. LR 1014 Monograph. 1981. – 41 p.
- Lowrie P.R. Scats, sydney co-ordinated adaptive traffic system: A traffic responsive method of controlling urban traffic. – No. 00772163 – 1990. – 28 p.
- Sims A.G., Dobinson K.W. The Sydney coordinated adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits // IEEE Transactions on vehicular technology. – 1980. – Vol. 29. – P. 130-137.
- Pavleski Daniel, Daniela Koltovska-Nechoska, and Edouard Ivanjko. Evaluation of adaptive traffic control system UTOPIA using microscopic simulation // 2017 International Symposium ELMAR. IEEE (Zadar, Croatia). – 2017 – P. 17-20.
- Robertson D.I., Bretherton R.D. Optimizing networks of traffic signals in real time—the SCOOT method // IEEE Transactions on vehicular technology. – 1991. – Vol. 40, No. 1. – P. 11-15.
- Andrews C.M., Elahi S.M., Clark J.E. Evaluation of New Jersey route 18 OPAC/MIST traffic-control system // Transportation research record. – 1997. – Vol. 1603. – P. 150-155.
- Samadi S., et al. Performance evaluation of intelligent adaptive traffic control systems: A case study // Journal of transportation technologies. – 2012. – Vol. 2. – P. 248 259.
- Jansuwan S., Narupiti S. Assessment of area traffic control system in bangkok by the microscopic simulation model // Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. – 2005. – Vol. 5. – P. 1367-1378.
- Wahlstedt J. Evaluation of the two self-optimising traffic signal systems Utopia/Spot and ImFlow, and comparison with existing signal control in Stockholm, Sweden // 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013) – 2013. – Vol. 1. – P. 1541-1546.
- Елькин Д.М., Вяткин В.В. Метод разработки систем для распределенного управления транспортными потоками на основе взаимосвязанных агентов //Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 1 (85). – С. 229-249.

# Система автономного интеллектуального управления средней группой роботов

**Веселов Геннадий Евгеньевич**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*gev@sfedu.ru*

**Лебедев Борис Константинович**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*lebedev.b.k@gmail.com*

**Лебедев Олег Борисович**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*lebedev.ob@mail.ru*

**Аннотация.** В работе рассматриваются результаты исследований в сфере управления группой беспилотных летательных аппаратов. Определены типы задач, которые могут выполняться группой воздушных роботов, выделены основные стратегии управления и их особенности. Сформированы общие позиции, необходимые для разработки детализированного алгоритма группового управления. Каждый робот должен ориентироваться в пространстве автономно без GPS по сигналам с собственной камеры или лидара (активного дальномера) определять помехи, выстраивать оптимальные пути движения и принимать решения, направленные на достижения цели и выполнения задачи.

**Abstract.** The paper discusses the results of research in the field of managing a group of unmanned aerial vehicles. The types of tasks that can be performed by a group of air robots are determined, the main control strategies and their features are highlighted. The general positions necessary for the development of a detailed group control algorithm have been formed. Each robot must navigate autonomously in space without GPS using signals from its own camera or lidar (active range finder), determine interference, build optimal movement paths and make decisions aimed at achieving the goal and completing the task.

**Ключевые слова:** *рой роботов, система управления, силовая релаксация, нейронная сеть, конечный автомат, децентрализованное взаимодействие, коллективная альтернативная адаптация, синергетический подход.*

**Keywords:** *swarm of robots, control system, force relaxation, neural network, finite state machine, decentralized interaction, collective alternative adaptation, synergistic approach.*

## I. ВВЕДЕНИЕ

Перспективное направление в области использования беспилотных летательных аппаратов – это их объединение в группы или в рой. Принцип организации роя моделирует поведение различных насекомых, обладающих «коллективным интеллектом», например, рой пчел, муравьиная колония и т.д. [1, 2]. В случае с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), после их объединения в рой, каждый БПЛА управляет собственной автоматикой, а поведением роя может управлять программа с элементами искусственного интеллекта или оператор [1, 2].

В связи с этим, основной целью при объединении БПЛА в рой, является повышение эффективности управления формированием и поддержанием строя автоном-

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-07-00260.

ных беспилотных летательных аппаратов. Достижение поставленной цели возможно за счет разработки методов и алгоритмов децентрализованного управления, учитывающих нелинейный характер структуры систем «автопилот-аппарат» [1, 2].

Полностью децентрализованное правило – это управление группой агентов, моделирующих мобильных роботов, которое обеспечивает движение группы агентов с соблюдением определённой геометрической структуры строя (определенных взаимных расстояний относительно друг друга), при условиях полной автономности агента и возможности получения информации только от своих ближайших соседей. Децентрализованное управление это способ, при котором основной объём вычислений производится не в наземном центре управления и планирования операций, а на борту беспилотных машин. Данний способ включает в себя три варианта управления группой воздушных роботов: коллективная, стаяная и роевая стратегии управления [2–4]. Строем будем называть требуемое расположение роботов на плоскости или в пространстве. В зависимости от того, каким образом задан целевой строй, строевая задача может иметь различную постановку [5, 6].

Основная задача состоит в том, чтобы «научить» рой разведывательных и ударных БПЛА (в состав роя может входить более ста аппаратов) не просто самостоятельно объединяться в группы и выбирать лидера (ведущего воздушного робота), но и «продумывать» план выполнения полетного задания. Система управления должна обладать искусственным интеллектом, средствами проведения сложных вычислений с воздействованием наземной составляющей (пункт управления) и бортовых средств миниатюрных беспилотных аппаратов [3, 5, 6].

В основе работы любой системы управления лежит следующая последовательность:

1. Измерение состояния системы.
2. Сравнение текущего состояния с желаемым.
3. Выработка воздействия для компенсации отклонения текущего состояния от желаемого.
4. Модуль автопилота, обеспечивающий решение таких задач, как:

а) пилотирование (автоматический полет по заданному маршруту, автоматический взлет и посадка, поддержание заданной высоты и скорости полета, стабилизация углов ориентации, принудительная посадка в экстренных ситуациях);

б) программное управление бортовыми системами и полезной нагрузкой.

Таким образом, бортовая система навигации и управления обеспечивает:

- полет по заданному маршруту (задание маршрута производится с указанием координат и высоты поворотных пунктов маршрута);
- изменение маршрутного задания или возврат в точку старта по команде с наземного пункта управления;
- автосопровождение выбранной цели;
- стабилизацию углов ориентации БПЛА;
- поддержание заданных высот и скорости полета (путевой либо воздушной);
- сбор и передачу необходимой информации о параметрах полета, а также работе целевого оборудования;
- программное управление устройствами целевого оборудования.

## II. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Основным способом решения задач планирования и управления является использование интеллектуальных технологий. При этом интеллектуальные технологии применяются для решения задач постановки и корректировки целей управления и программы действий по реализации этих целей, а также для формирования алгоритма управления в условиях неопределенности, обусловленной различными факторами, в исполнительных элементах, подсистеме управления движением, подсистеме планирования и поведения [7–10].

В настоящее время выявились три подхода в изучении искусственного интеллекта. Первый подход – это прямое использование накопленных профессиональных знаний человека. Он реализуется в экспертных системах. Второй подход – классический основан на составлении программ, реализующих на базе современных компьютеров такие специфические функции, как анализ зрительных образов, распознавание звуков речи, перевод с одного языка на другой, логические операции, заключающиеся в воспроизведении программно-алгоритмического обеспечения естественного интеллекта. Третий – альтернативный путь создания искусственного интеллекта основан на построение сетей из нейрона подобных элементов, осуществляющих параллельную обработку информации [11].

Успехи классического направления основывалось на бурном развитии компьютерной техники, что позволило создать компьютерные программы, результатом выполнения которых стали эффекты, достигаемые обычно

только в процессе мыслительной деятельности человека. Однако решение этих задач (распознавание образов, анализ сцен, перевод с одного языка на другой) натолкнулось на ряд трудностей, связанных, прежде всего с объемом вычислений, требующих все большего быстродействия компьютера, которое ограничивается конечной скоростью распространения электромагнитных колебаний, определяющих время прохождения сигнала от одного элемента к другому. Обойти этот физический барьер можно на основе проведения вычислений в ряде параллельно работающих процессоров. Недостатком этого подхода является резкий рост сложности аппаратной реализации, и усложнение программирования в связи с тем, что для управления прохождения сигналов необходим специальный компьютер. Исследование нервных клеток мозга человека привело к выводу, что высокая эффективность решения задач, связанных с мыслительной деятельностью человека, при низкой скорости распространения нервных импульсов, основана на принципе параллельной обработки информации, сочетается с отсутствием явного программирования.

Работы по классическому искусственному интеллекту пошли по пути создания экспертных и диагностических систем [9–12].

## III. СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ

В данной работе система управления строится как совокупность экспертной системы (ЭС), набора компьютерных программ, искусственной нейронной сети и блока адаптации на основе конечных автоматов адаптации.

Основная задача экспертной системы – научитьвой разведывательных и ударных беспилотников не просто самостоятельно объединяться в группы и выбирать лидера (ведущего воздушного робота), но и «продумывать» план выполнения полетного задания. Формируемая группа беспилотников предназначена для сопровождения небольших пехотных подразделений при действиях в условиях плотной городской среды, предоставляя бойцам необходимую информацию. Это становится возможным благодаря наличию специального перечня тактических действий, оформленных в виде набора правил ЭС которые могут выполняться группой боевых БПЛА [3, 11–14].

Набор правил ЭС «защит» в программном обеспечении пульта управления, которым пользуется оператор. Здесь прослеживается принцип «смешивания» стратегий централизованного управления (оператор задает «тезисы» полетного задания) и децентрализованного управления (сформированная группа БПЛА выполняет полетное задание на основе обработки полученных от оператора исходных данных и информации из окружающей среды). Для набора правил, по которым система управления роботом осуществляет управление маневрированием роботов для соблюдения требуемой дистанции между аппаратами, и в то же время без чрезмерного сближения с препятствиями, были разработаны структуры и методы маневра, выполняемых роботом для коррекции отклонений параметров.

Для управления маневрированием роботов, авторами были разработаны и использованы алгоритмы параметрической адаптации, основанные на методах колектив-

ной альтернативной адаптации. Результатом работы этих алгоритмов является устойчивость строя и сохранение качества переходных траекторий каждого из роботов роя. Создана система управления роем роботов для задачи мониторинга области: поиска цели, составления кадастровых планов промышленных объектов, транспортной инфраструктуры, создания карт, планов и 3D-моделей объектов [13, 14].

В основу системы управления роем роботов положены методы построения оптимальной траектории достижения цели, а также принципы командной работы роботов, совместно выполняющих диагностику труднодоступных объектов [11].

Были использованы разработанные методы разбиения роя роботов на кластеры и их нумерация, в соответствии с пространственным расположением и по типу действий для достижения общей цели. Разработан общий сценарий действий роботов для решения поставленной задачи путем последовательной передачи информации о действиях роботов по предварительно упорядоченному списку, что позволяет согласовать их действия некоторым оптимальным образом. Разработаны методы и принципы согласования действий всех роботов (агентов) при наличии между ними канала обмена информацией достижения общей цели (решения поставленной задачи). Кроме того, были разработаны системы управления небольшой группой мобильных роботов для задачи автоматического перестроения в условиях неопределенностей и препятствий [13].

Вариант успешного управления группой БПЛА заключается в использовании интеллектуальной «облачной» системы управления, позволяющей одному оператору контролировать полёт и функционирование группы миниатюрных беспилотников. Построение группы в воздухе осуществлялось на основе шаблонов (схем), заранее разработанных в определённом формате правил ЭС и загруженных в «облачную» систему. Обзор современных достижений по обеспечению группового применения миниатюрных БПЛА свидетельствует о том, что оператору может быть предоставлено специальное средство, с помощью которого он может управлять не просто несколькими беспилотниками, а целыми сотнями и даже тысячами миниатюрных аппаратов. Основным требованием является оценка возможностей создания аппаратурой многофункциональных комплексов с миниатюрными БПЛА, обеспечивающих сочетание принципов централизованного и децентрализованного управления. Алгоритм управления группой БПЛА должен позволять определять условия и способы определения рационального состава боевой группы, решать задачи ситуационного моделирования, целераспределения и оценки эффективности выполнения полётного задания. Для создания эффективной системы автономного интеллектуального управления группой роботов были решены следующие задачи [1–3]:

- Синтез системы стабилизации нелинейного объекта управления.
- Синтез системы управления нелинейным объектом в условиях неопределенностей.

- Синтез интеллектуальной системы управления небольшой группы мобильных роботов для задачи автоматического перестроения в условиях неопределенностей и препятствий.
- интегратор интеллектуальной системы управления группой квадрокоптеров для задачи мониторинга области: поиска цели, построения оптимальной траектории достижения цели.

БПЛА в рое не только не должны сталкиваться, но также не должны мешать друг другу создаваемыми ими воздушными потоками. В рое они должны иметь возможность коллективно распределять «специальности» и при необходимости перераспределять назначения данные отдельным участникам роя, например, при выходе из строя тех или иных «специалистов» [1–4].

В свою очередь нейронная сеть преобразует входные вещественные переменные в логические, которые подаются на вход конечному автомату. Он, в свою очередь, вырабатывает выходные воздействия. Для оптимизации этой модели используется генетическое программирование. Каждый беспилотный летательный аппарат управляет системой, состоящей из нейронной сети и конечного автомата. Таким образом, можно говорить, что используется мультиагентный подход – каждый летательный аппарат представляет собой агента, взаимодействующего с внешней средой и другими агентами. При этом, нейронная сеть используется для классификации значений вещественных входных переменных и выработки входных логических переменных для автомата, а автомат – для выработки выходных воздействий на беспилотный летательный аппарат [12].

На основании представленной выше информации можно сделать вывод о необходимости разработки системы управления для беспилотного летательного аппарата, с возможностью использования системы управления не только для одного объекта, но и для группы объектов. При обеспечении управления группой беспилотных летательных аппаратов важно обратить внимание на такие особенности как:

- взаимодействие БПЛА в группе;
- обеспечение получения и передачи информации;
- контроль группы в целом.

Взаимодействие беспилотников в группе представляется собой управление действиями БПЛА и контроль их выполнения, обеспечение безопасности полета, то есть предотвращение действий, имеющих нежелательные для объекта системы управления последствия, например избежание столкновений, оценка относительного положения группы и ее объектов. При постановке задачи также следует предусмотреть и возможность изменения поведения системы вследствие изменений внешней среды.

Отметим, что важнейший вклад в нейронауку внесла детекторная теория. Были получены данные об активном характере сбора информации. Введение активных форм сбора и обработки информации открыли новые возможности технических решений. Исследование детекторных систем показало, что кроме выделения элементарных свойств объектов принцип нейронного детектирования распространяется на более сложные аспекты восприятия [12].

#### IV. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТИВОМ РОБОТОВ В ВИДЕ ЗАДАННОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФИГУРЫ

Рассмотрим актуальную проблему математического моделирования и теории управления: задачу децентрализованного управления мультиагентной системой, состоящей из агентов, моделирующих автономных роботов, с целью обеспечения движения группы агентов строем, имеющим заданную геометрическую форму [1, 2, 13, 14].

В биологических системах существуют подобные задачи, например задача флокирования. Задача флокирования (для стайного поведения птиц и рыб также употребляется термин «мурмурение») строя (англ. flocking – скакаться) в литературе общепринято понимается как децентрализованное формирование и поддержание группой автономных роботов (в том числе и БПЛА) заданной геометрической формы с целью выполнения некоторой сложной кооперативной задачи. В связи с развитием технологий становится очевидным, что большие группы БПЛА, обладающие автономностью и способные коммуницировать между собой, изучать окружающую обстановку сенсорами и обрабатывать информацию на борту с помощью собственных вычислительных мощностей, требуют децентрализованных подходов [13, 14].

При решении таких задач, управление осуществляется с помощью алгоритма альтернативной коллективной адаптации, основанного на идеях коллективного поведения объектов адаптации. Для реализации механизма адаптации параметрам вектора сопоставляются автоматы адаптации, моделирующие поведение объектов адаптации в среде. Разработана структура процесса альтернативной коллективной адаптации, под управлением которого осуществляется передвижение группы роботов в строю [12].

##### A. Передвижение группы роботов развернутых в линию на основе коллективной адаптации

На базе правил заложенных в экспертную систему разработана система управление движением группы роботов, развернутых в линию на основе коллективной адаптации.

Подход к решению этой задачи состоит в формализации понятия отклонения текущего положения ведомого робота  $R_i$  от требуемого положения. Это достигается на основе визуальной информации и поиске такого управления с обратной связью, которое обеспечивает сведение к нулю нормы этого отклонения. Для управления движением робота параллельно траектории ведущего (предыдущего) робота  $R_{i-1}$  использованы кинематические уравнения в переменных состояния, характеризующих выполнение цели управления. Решена задача локализации роботов с использованием относительного положения [13].

Управление движением группы роботов, осуществляется алгоритмом, на основе идей коллективного поведения объектов адаптации.

Объектами адаптации ведомого робота  $R_i$  являются рассматриваемые в качестве управлений параметры вектора  $W_i$  – положение и ориентация робота в абсолютной системе координат, и линейная скорость робота соответственно. Коллектив объектов адаптации (их совокупность) группы роботов развернутых в линию соответствует объекту оптимизации.

Такая система управления движением группы роботов, может применяться при мониторинге линий электропередач, трубопроводов, дорог, госграницы, особо охраняемых объектов, зон аэропортов, акваторий портов, для обнаружения лесных пожаров, при ликвидации чрезвычайных ситуаций, для проводки судов во льдах. В потребительском секторе – для съемки спортивных соревнований, рекламных роликов, отслеживании нарушителей ПДД.

##### B. Передвижение группы роботов развернутых в колонну на основе коллективной адаптации

Подход к решению этой задачи заключается в локализации роботов с использованием относительного положения. Особое внимание уделено получению закона управления движением роботов в колонне.

В первой постановке рассматривается колонна – строй, в котором роботы расположены последовательно друг за другом на заданной дистанции. Роботы пронумерованы от  $R_0$  – ведущего робота до  $R_n$  – замыкающего колонну. Этот тип движения требует, чтобы каждый робот  $R_i$ , кроме первого ведущего, двигался по траектории, вдоль которой движется робот  $R_{i-1}$ , с некоторым временным запаздыванием  $T$ . Ведущий робот  $R_0$  может быть оснащен сенсорной системой, позволяющей ему планировать траекторию в непредсказуемой обстановке, в то время как остальные роботы должны просто повторять траекторию своего ближайшего соседа.

Отметим, что рассматривается система, в которой агенты перемещаются в обычном евклидовом пространстве с дискретным временем.

Управление движением группы роботов в строю типа «конвой» осуществляется с помощью алгоритма альтернативной коллективной адаптации, основанного на идеях коллективного поведения объектов адаптации [14].

Объектами адаптации догоняющего робота  $R_i$  являются рассматриваемые в качестве управлений параметры вектора  $V_i$  – положение и ориентация робота в абсолютной системе координат, и линейная скорость робота соответственно. Коллектив объектов адаптации (их совокупность) группы роботов в строю типа «конвой» соответствует объекту оптимизации (ОО).

##### C. Управление поведением роя БПЛА применительно к задачам мониторинга некоторой территории

Работа посвящена проектированию биоинспирированных методов и алгоритмов управления коллективным поведением роботов на основе моделей адаптивного поведения многоагентных биологических систем в области: обнаружение вредных веществ; проведение поисково-спасательных операций в зонах природных и техногенных катастроф, а также зонах боевых действий, патрулирование границы некоторой области. Основополагающей идеей роевого управления является «кроевой интеллект». В основу управления гомогенным роем роботов положен принцип силовой релаксации. Поиск решения производится в аффинном пространстве, элементами которого являются  $n$ -мерные точки (позиции). Каждый робот  $r_i$  вычисляет целевую функцию  $f(X_i(t))$  – значение искомого вещества в точке  $X_i(t)$ . Фундаментальная проблема, которая была решена в данной работе, связана с разработкой структуры аффинного пространства позиций, позволяющей отображать и осуществлять поиск интерпретаций решений с целочисленными значениями параметров. Значения координат должны быть дискрет-

ными и независимыми друг от друга. В отличие от канонического метода роя частиц, для уменьшения веса аффинных связей, путем перемещения частицы  $p_i$  в новую позицию аффинного пространства решений разработан оператор направленной мутации, суть которого заключается в изменения целочисленных значений генов в хромосоме. Разработаны новые структуры хромосом для представления решений [15, 16].

Общей целью проведенных исследований является повышение эффективности управления формированием и поддержанием строя автономных БПЛА за счет разработки:

1. Методов и алгоритмов децентрализованного управления, учитывающих нелинейный характер структуры систем «автопилот-аппарат».

2. Методы управления строем БПЛА в различных сценариях.

3. Алгоритмы формирования управляющих воздействий БПЛА, полученные посредством нелинейного синтеза («бэкстеппинга») и позволяющие повысить порядок модели системы строя БПЛА, а также гарантировать сходимость курсовых углов и скоростей к задаваемым посредством законов управления и применить адаптивную настройку неопределенных параметров системы.

4. Алгоритмы адаптивной самонастройки коэффициентов в режиме реального времени по эталонной модели на основе теории нечеткой логики, а также интегральной параметрической самонастройки, позволяющие сохранить устойчивость системы строя и значительно улучшить качество переходных траекторий БПЛА, в случае если они ухудшаются из-за неизвестным образом изменившейся динамики аппаратов.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены новые математические методы моделирования движения роботов. Рассмотрены задачи управления движением коллектива роботов в колонну, развернутых в линию и при мониторинге некоторой территории. Способ управления заключается в том, чтобы в процессе движения в каждый момент времени  $t$  производилось перепланирование параметров движения каждого робота  $R_i$ , движущегося параллельно с соседним роботом  $R_{i+1}$ . Управление осуществляется с помощью алгоритма альтернативной коллективной адаптации, основанного на идеях коллективного поведения объектов адаптации. Целью управления ведомыми роботами является минимизация отклонений. Для реализации механизма адаптации параметрам вектора сопоставляются автоматы адаптации, моделирующие поведение объектов адаптации в среде. Разработана структура процесса альтернативной коллективной адаптации, под управлением которого осуществляется передвижение группы роботов.

Разработаны оригинальные правила управления параметрами, обладающие рядом преимуществ по сравнению с другими методами: полная децентрализация управления в сочетании с динамической коррекцией параметров роботов, задающих положение и ориентацию робота в абсолютной системе координат, и линейную скорость робота соответственно. Предложена структура маневра, выполняемого роботом для коррекции отклонений параметров. Управление осуществляется с помощью алгоритма альтернативной коллективной адаптации, что позволяет эффективно обрабатывать

внештатные ситуации, такие как выход агентов из строя, изменения числа агентов вследствие выхода из строя или внезапного приобретения связи с очередным агентом, а также в условиях наличия ошибок измерений и шумов, удовлетворяющих определенным ограничениям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Карпов В.Э. Коллективное поведение роботов. Желаемое и действительное // Современная мехатроника: Сб. научн. трудов Всероссийской научной школы. – 2011. – С. 35-51.
2. Городецкий В.И. Управление коллективным поведением роботов в автономной миссии. // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – №1 (10). – С. 40-54.
3. Бабич Л.А. Групповое применение разведывательных и ударных беспилотных летательных аппаратов // Молодой ученый. – 2019. – № 45 (283). – С. 3-6.
4. Царев Ф.Н. Совместное применение генетического программирования, конечных автоматов и искусственных нейронных сетей для построения системы управления беспилотным летательным аппаратом. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://is.ifmo.ru/works/2008/Vestnik/53/03-genetic-neuro-automata-flying-plates.pdf>.
5. Иноземцев Д.П. Беспилотные летательные аппараты: теория и практика. Часть 1. Обзор технических средств. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.credo-dialogue.com/getattachment/6cf5bf18-cf53-4532-b5bd-1ed04dabc234/Bespilotnue-letatelnue-apparatu.aspx>.
6. Матвеев Е.В., Глинников В.А. Нечеткий логический вывод в системе управления беспилотным летательным аппаратом. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/2311/2272/1/09\\_Matveev.pdf](http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/2311/2272/1/09_Matveev.pdf).
7. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Лебедева Е.М. Гибридный алгоритм ситуационного планирования траектории на плоскости в условиях частичной неопределенности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2018. – № 1. – С. 76-93.
8. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Hybrid Algorithm of Mobile Position-Trajectory Control // Artificial Intelligence Methods in Intelligent Algorithms. Proceedings of the 8th Computer Science On-line Conference, Springer, Czech Republic. – 2019. – Vol. 2. – P. 287-295.
9. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Гибридный алгоритм управления роем гомогенных роботов в условиях ограниченного пространства // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (78). – С. 72-82.
10. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Планирование двухмерной траектории в условиях частичной неопределенности на основе интеграции волнового и муравьиного алгоритмов // 5-я Всероссийская Постполовская конференция с международным участием «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы» ГИСИС'2020. – Зеленоградск: Изд-во Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта. – 2020. – С. 87-94.
11. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Биоинспирированный алгоритм планирования траектории в условиях частичной неопределенности и наличии перемещающихся препятствий // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сборник научных трудов XI-й Международной научно-технической конференции (ИММВ-2022). – Смоленск: Универсум. – 2022. – С. 238-246.
12. Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Поисковая адаптация: Теория и практика: – М.: Физматлит, 2006. – 272 с.
13. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Адаптивное управление передвижением коллектива мобильных роботов развернутых в линию // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сборник научных трудов X-й Международной научно-технической конференции (ИММВ-2021). – Смоленск: Универсум. – 2021. – С. 238-246.
14. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Управление движением группы мобильных роботов в колонне // Научно-практический журнал Информатизация и связь. – 2021. – № 3. – С. 7-11.
15. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Управление роем роботов при исследовании некоторой территории методом силовой релаксации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 5. – С. 184-193.
16. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Management of Behavior of a Swarm of Robots Applicable to the Tasks of Monitoring a Some Territory // Artificial Intelligence Methods in Intelligent Algorithms. Proceedings of the 9th Computer Science On-line Conference. Springer, Czech Republic. – 2020. – Vol. 2. – P. 324-332.

# Система управления движением автономного транспорта на основе методов машинного обучения

Ылдаева Мая

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия

Карманцева Алина

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия

**Аннотация.** Искусственный интеллект – это область исследований, которая рассматривается как средство реализации цифровизации и индустрии 4.0. Это считается критически важной технологией, необходимой для будущего развития производственных систем. В то же время автономные управляемые транспортные средства разрабатывались как неотъемлемая часть благодаря гибкости, которую они вносят в весь производственный процесс в рамках производственных систем. Тем не менее, в интеллектуальном управлении этими транспортными средствами все еще остаются открытые проблемы. Управление движением является серьезной проблемой для транспортной системы, потому что все транспортные средства должны контролироваться в режиме реального времени, чтобы справиться с такими неопределенностями, как перегрузка. Однако существующие системы управления движением, которые в первую очередь спроектированы и контролируются экспертами-людьми, недостаточны для предотвращения сильных заторов, препятствующих производству. В этом исследовании мы разработали систему управления трафиком, основанную на прогнозах машинного обучения.

**Ключевые слова:** интеллектуальное управление движением; Обучение машин; системы транспортных средств.

## I. ВВЕДЕНИЕ

С последними достижениями в области искусственного интеллекта (ИИ), машинного обучения (МО) и глубокого обучения (ГО) различные применения этих методов приобрели известность и выдвинулись на новый план. Одним из таких применений являются беспилотные автомобили, которые, как ожидается, окажут глубокое и революционное влияние на общество и то, как люди ездят на работу [1]. Хотя принятие и одомашнивание технологий может столкнуться с первоначальным или длительным нежеланием, но эти автомобили ознаменуют первую далеко идущие интеграции персональных роботов в человеческое общество [2]. В последнее десятилетие наблюдается растущий исследовательский интерес к применению ИИ для вождения автомобилей [3]. Благодаря быстрому прогрессу в области ИИ и связанных с ним технологий автомобили в конечном итоге, готовы эволюционировать в автономных роботов, которым доверена человеческая жизнь, и оказать разнообразное социально-экономическое воздействие [4]. Однако для того, чтобы эти автомобили стали функциональной реальностью, они должны быть оснащены восприятием и познанием для решения реальных сценариев

высокого давления, принятия подходящих решений и принятия соответствующих и безопасных действий в любое время.

В ИИ беспилотных транспортных средств встроены системы визуального распознавания (СВР), которые включают в себя классификацию изображений, обнаружение объектов, сегментацию и локализацию для базовой глазной производительности. Обнаружение объектов становится под доменом компьютерного зрения (КЗ), который выигрывает от ГО, особенно сверточных нейронных сетей (СНС). В этой статье обсуждаются системы зрения беспилотных автомобилей, роль ГО в интерпретации сложного зрения, улучшении восприятия и реализации кинематических маневров в беспилотных автомобилях. В этой статье рассматриваются методы, которые адаптируйте ГО для обнаружения объектов и восприятия сцены в беспилотных автомобилях. В опросе мы также отвечаем на следующие вопросы, высоко оценивая вклад ГО в эти области:

## II. СИСТЕМЫ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

Системы глубокого обучения и машинного обучения набрали обороты с развитием автономных систем, технологий и компаний по идеи беспилотных водителей, которые быстро приобретают значение в автомобильной промышленности. Значительное расстояние было достигнуто за счет интеграции некоторых примеров планирования, используемых в робототехнических системах, в автономное вождение транспортных средств. Локальное планирование используется для движения транспортных средств и возможности смены полосы движения на перекрестках, а поведенческое планирование выполняет задачи мгновенного реагирования в таких ситуациях, как транспортные средства, которые неожиданно уезжают. Можно сказать, что автономные транспортные средства появились в результате слаженной работы этих типов планирования, датчиков и систем.

С развитием автономных транспортных средств мы теперь можем получать и оценивать несколько данных в наших транспортных средствах с помощью инструментов подключения. Используя датчики, камеры, GPS, ультразвуковые радары и многие другие инструменты, наш автомобиль может автоматически выполнять такие команды, как скорость автомобиля, местоположение, оценка транспортного потока и ориентация автомобиля.

Эти системы нацелены на использование алгоритмов искусственного интеллекта с логикой глубокого обучения и обеспечение безопасного вождения в автономных транспортных средствах.

Что такое машинное обучение (машинное обучение)? Есть две модели системы машинного обучения, они делятся на две как с учителем и без учителя. При неконтролируемом обучении машинное обучение берет неразмеченные данные и не имеет инструкций о том, как их обрабатывать, поэтому машина сама должна решить, как она работает. В контролируемой модели алгоритм получает инструкции о том, как интерпретировать входные данные. Это предпочтительный подход к обучению самоуправляемых автомобилей. Это позволяет алгоритму оценивать данные обучения на основе полностью размеченного набора данных, что делает обучение с учителем более полезным, когда дело доходит до ситуации классификации.

Что такое глубокое обучение? Глубокое обучение – это подвесь машинного обучения, которая имеет стиль обучения, специфичный для данных, в отличие от более узких алгоритмов искусственного интеллекта для конкретных задач. В глубоком обучении обучение может быть контролируемым, неконтролируемым или полу-контролируемым. Можно сказать, что это метод машинного обучения, состоящий из более чем одного слоя, который предсказывает результаты с набором данных, предоставленным системе. Как написаны выше, глубокое обучение может выполняться с учителем, полуучителем или без учителя. При глубоком обучении он сам изучает отличительные особенности с большим количеством записей данных. Чем больше данных вводится для процесса обучения, тем успешнее он будет, и данные проходят через несколько слоев, а верхние слои определяются как слои, которые извлекают больше деталей.

3 основных типа моделей глубокого обучения:

- Многослойные персептроны.
- Сверточные нейронные сети.
- Рекуррентные нейронные сети.

Области, в которых используются методы глубокого обучения, – это системы распознавания лиц, системы автономных транспортных средств, системы распознавания голоса, системы камер и некоторые области здравоохранения. Чрезвычайно важно, чтобы эти системы, которые будут играть большую роль в нашей жизни в будущем, были объяснены и изучены в нашей стране. Подобно тому, что люди узнали из опыта, алгоритм глубокого обучения работает лучше с небольшой настройкой каждый раз, чтобы улучшить результат.

### III. Сопутствующая РАБОТА

#### A. Системы для самоуправляемых автомобилей

Благодаря инновационным технологиям и их использованию в производстве транспортных средств, автомобили стали чем-то большим, чем просто средством передвижения. Создание умного автомобиля представляет идею самоуправляемого транспортного средства, который становится безопаснее для водителя. Таким обра-

зом, самоуправляемые автомобили совершили огромную эволюцию в области компьютерного зрения, используя две методологии для практики самостоятельного вождения автомобиля.

Первая методология – это “Контролируемое обучение”. Суть заключается в следующем. Автомобиль ездит по дорогам, собирая более трех тысяч данных, что дает точность передвижения 89 %. Цель – создать динамическое место назначения, заставляя следующую в потоке машину следовать за целевой машиной, которая знакома со своим пунктом назначения и постоянно получает новое направление и местоположение цели.

#### B. Определение полосы движения

Полосы движения – важный метод, необходимый для создания автомобиля с интеллектом. Крайне важно контролировать движение автомобиля в соответствии с полосой движения, на которой он находится. В исследовательской работе обсуждается реализация алгоритма в сочетании с различными методами. Преобразование Хафа для выделения объектов, SVM для машинного обучения вместе с выбором линий, краев и областей.

Кроме того, вводится проблема различного освещения, которое воздействует на систему. С другой стороны, Сатзода и др. улучшили алгоритм преобразования Хафа, введя иерархическое аддитивное преобразование Хафа (НАНТ) для достижения точности передвижения, равной 99%. Использование алгоритмов YOLO и CNN было введено для того, чтобы система, обнаруживая полосы движения, смогла предлагать водителю наиболее верный маршрут. Однако эта система была настоятельно рекомендована только на автомагистралях, а не на городских дорогах.

#### C. Стереовидение

Stereo Vision – это поиск глубины на основе двух изображений. Наши глаза похожи на две камеры. Поскольку они смотрят на изображение под разными углами, они могут вычислить разницу между двумя точками зрения и установить оценку расстояния. Стереовидение для беспилотных автомобилей становится все более популярным в наши дни. Область компьютерного зрения сильно выросла за последнее десятилетие, особенно для обнаружения препятствий и компьютерного зрения с использованием глубокого обучения:

- Методологии внедрения.
- Определение полосы движения.

Существуют некоторые методы, которые используются для точного определения дорожных полос. Одним из таких методов является обнаружение краев, включающий в себя различные математические методы, которые идентифицируют точки, используемые для обнаружения краев в захваченных видеокадрах.

Метод определения полосы движения применяется с помощью нескольких шагов, которые включают применение фильтра Гаусса для сглаживания видеокадра, а также удаление шума, определение интенсивности изображения. Затем, наконец, отслеживаются обнаруженные ребра и соединяются. Фильтры, такие как оттенки серого и размытие, также применяются к захваченным

кадрам для их сглаживания, чтобы упростить применение некоторых методов. На этом этапе используется преобразование Хафа. Это вычислительный алгоритм, применяемый для параметрической идентификации геометрических элементов растрового изображения. Используется в анализе изображений, цифровой обработке изображений и компьютерном зрении. Предназначен для поиска объектов, принадлежащих определённому классу фигур, с использованием процедуры голосования. Процедура голосования применяется к пространству параметров, из которого и получаются объекты определённого класса фигур по локальному максимуму в так называемом накопительном пространстве, которое строится при вычислении трансформации Хафа. Цель всей методологии состоит в том, чтобы найти идентификацию линий на полученном цифровом изображении и нарисовать по этим линиям виртуальный путь, который должен быть выбран автомобилем.

$$r = x\cos\theta + y\sin\theta. \quad (1)$$

Преобразование Хафа определяется уравнением 1, где  $r$  – расстояние от начала координат до ближайшей точки на прямой и угол между осью  $x$  и линией, соединяющей начало координат с этой ближайшей точкой. Линии рисуются на реальной полосе движения, чтобы распознать путь, по которому следует двигаться. Затем одноплатный компьютер «Raspberry Pi» отправляет на выход три сигнала: правый, левый и прямой, и принимает решение о перемещении в соответствии с сигналом обнаруженного порогового значения и угла тета.

#### IV. ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛИЙ

Для считывания и сбора данных о направлении движения автомобиля и осях вращения требуется два датчика. Эти датчики акселерометр и гироскоп. Акселерометр – это датчик, который просто измеряет действующую на него силу ускорения. Гироскоп – это датчик, который немного более совершенен, чем акселерометр, поскольку он может измерять ориентацию и скорость вращения самого себя. Поэтому используется блок MPU-6050, который представляет собой небольшой аппаратный блок, состоящий из этих двух датчиков. Для точного обнаружения дорожных аномалий автомобиль должен был пройти два основных этапа. Этап предварительной обработки и этап обработки.

**Секция V**

**УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ  
С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ  
ПАРАМЕТРАМИ**

DOI: 10.18522/syssyn-2022-42

**Проектирование распределенных систем управления  
с использованием результатов экспериментальных  
исследований**

**Першин Иван Митрофанович**  
Пятигорский институт (филиал) СКФУ  
Северо-Кавказский федеральный  
университет  
Пятигорск, Россия  
*ivtmp@yandex.ru*

**Носова Виктория Андреевна**  
С.-Пб. Горный университет  
Санкт-Петербург, Россия  
*Vikaa27.09@mail.ru*

**Малков Анатолий Валентинович**  
Пятигорский институт (филиал) СКФУ  
Северо-Кавказский федеральный  
университет  
Пятигорск, Россия  
*anatol.malkov@yandex.ru*

**Аннотация.** В докладе рассматривается методика проектирования распределенных систем управления гидролитосферными процессами с использованием результатов опытно-фильтрационных работ. В рамках рассматриваемой методики рассмотрено решение следующих задач: определение параметров аппроксимирующих звеньев с использованием результатов ОФР; оптимизация числа добывающих скважин при разработке месторождения; использование аппроксимирующих звеньев для проектирования распределенных систем управления гидролитосферными процессами.

**Abstract.** The report discusses the methodology for designing distributed control systems for hydrolithospheric processes using the results of experimental filtration work. Within the framework of the technique under consideration, the solution of the following problems is considered: determining the parameters of approximating links using the results of the OFR; optimization of the number of production wells in the field development; use of approximating links for designing distributed control systems for hydrolithospheric processes.

**Ключевые слова:** опытно фильтрационные исследования, проектирование распределенных систем управления, гидролитосферные процессы.

**Keywords:** experimental filtration studies, design of distributed control systems, hydrolithospheric processes.

**I. ВЕДЕНИЕ**

Как известно, решение математических моделей распределенных объектов, принадлежащих к классу пространственно-инвариантных) представляется бесконечной совокупностью собственных вектор-функций оператора объекта (пространственных мод) [1]. При этом фазовое пространство каждой пространственной моды имеет бесконечные размеры. При использовании

численных моделей распределенных объектов, мы переходим к другому объекту (дискретному аналогу реального процесса), свойства которого не в полной мере отражают физические свойства исходного распределенного объекта [1]. Численные модели играют важную роль при исследовании развития процессов на ближнюю и дальнюю перспективы. Эти модели часто используются и при проверке работы алгоритмов управления рассматриваемым процессом [2, 3]. В этих случаях используют верификацию численных (дискретных) моделей исходя из близости статических и динамических характеристик рассматриваемым характеристикам непрерывной модели или реального процесса [4, 5]. В сосредоточенных системах статические и динамические характеристики определяются исходя из реакции объекта на статические и динамические входные воздействия. В распределенных системах статические и динамические характеристики определяются с использованием реакции объекта на пространственные моды (собственные вектор-функции оператора объекта). В [1, 5–7] показаны передаточные функции аппроксимирующих распределенных звеньев и процедуры определения параметров рассматриваемых звеньев, использующие полученные статические и динамические характеристики. Известно, что статические и динамические характеристики распределенных объектов изменяются во времени. В последнее время существенно возросли нагрузки на водоносные горизонты в гидролитосфере [8, 9]. Для оценки изменений в гидролитосфере используется опытно-фильтрационные работы.

## II. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Рассматриваемая методика проектирования распределенных систем опирается на экспериментальные исследования объекта управления (гидролитосферного процесса). (Известно, что в гидрогеологии гидравлические параметры и дебиты измеряются в суточном диапазоне, а в вычислительной технике (в контроллерах, компьютерах) используется секундный диапазон. При описании методики, будем представлять вычисленные и используемые параметры в рассматриваемых диапазонах). Положим, что экспериментальные исследования (опытно-фильтрационные работы (ОФР) были проведены с использованием добывающей и контрольных скважин, показанных на рис. 1,а).

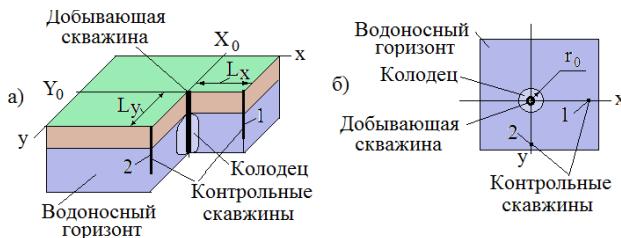


Рис. 1. Схема расположения скважин

В результате опытно-фильтрационных работ получены следующие параметры: K1=0.003 (удельное понижение уровня скважины – (понижение уровня в добывающей скважине(м.))/ (дебит (м3/сут.)); радиус колодца добывающей скважины  $r_0=0.2$  м. [1] (известно, что внутри колодца на плоскости x,y понижение уровня принимается постоянным); K2= 0.0003 (коэффициент гидравлического взаимодействия добывающей скважины и контрольной скважины 1,  $L_x=18$ м.); K3=0.00015 (коэффициент гидравлического взаимодействия добывающей скважины и контрольной скважины 2,  $Ly=20$ м.); График изменения уровня в колодце добывающей скважины (рис. 2), при гармоническом входном воздействии ( $Q(t)=Q+0.2\cdot Q \cdot \sin(\omega \cdot t)$ ,  $\omega=0.0002$  1/сек. (или  $\omega=17.28$  1/сут.),  $Q=100$  м.3/сут. (или  $Q= 100/(3600\cdot 24)$  м.3/с.)).

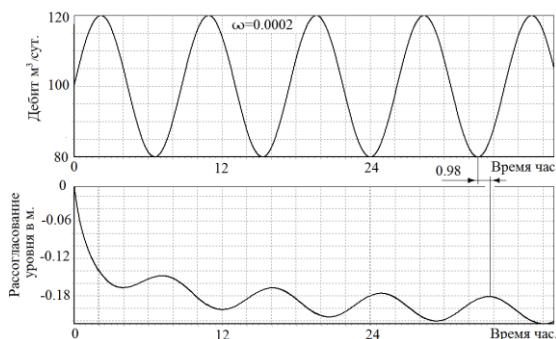


Рис. 2. Изменение уровня в добывающей скважине

Методика проектирования распределенных систем управления состоит из следующих этапов:

1. Определение параметров аппроксимирующего звена, структура которого задана в виде:

$$W_a(s) = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot (x^2 + (K_p \cdot y)^2)^{0.5}) \cdot \beta = \left( \frac{S}{a} + D \right)^{\frac{1}{2}}, (x^2 + y^2) \geq r_0, \quad (1)$$

$$W_a(s) = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0) \cdot \beta = \left( \frac{S}{a} + D \right)^{\frac{1}{2}}, (x^2 + y^2) < r_0,$$

Расчетная схема показана на рис. 1,б.

Для определения параметров аппроксимирующего звена (1) [4–6] получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0), \\ K_2 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_x), \\ K_3 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot K_p \cdot L_y), \beta = (D)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (2)$$

Подставим полученные в результате ОФР значения параметров в (2)

$$\begin{cases} 0.003 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot 0.2), \\ 0.0003 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot 18), \\ 0.00015 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot K_p \cdot 20), \beta = (D)^{\frac{1}{2}} \end{cases}$$

и решая приведенную выше систему, получим:

$$D=0.01673368, K=0.00039825, K_p=1.167916 .$$

Коэффициент гидравлического взаимодействия скважин рассматриваемого объекта записывается в виде:

$$W_{a,s} = \frac{0.00039825}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot (x^2 + (1.1679167 \cdot y)^2)^{0.5}), (x^2 + y^2) \geq r_0; \quad (3)$$

$$W_{a,s} = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0), (x^2 + y^2) < r_0, \beta = (0.01673368)^{0.5}.$$

Используя реакцию объекта на гармоническое входное воздействие (см. рис. 2), определим сдвиг по фазе сигнала выхода относительно входного сигнала [1] (период колебаний входного сигнала составляет 8.72 час.):

$$\Delta\phi = -2\pi \cdot 0.98 / 8.72 = -0.706 \text{ рад.}$$

Полагая в (1)  $s=j\omega$ , и преобразуя, определим фазу аппроксимирующего звена:

$$\Delta\phi = -\text{Im}(\beta) \cdot r_0 - \arctan(\text{Im}(\beta) / \text{Re}(\beta)),$$

$$\beta = \left( \frac{j\omega}{a} + D \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Подставляя вычисленные значения  $\Delta\phi$ ,  $D$ ,  $K$ ,  $K_p$ ,  $\omega=0.0002$  1/с. в (4) и решая численным методом, придем к следующему результату:

$$a=0.002761 \text{ м}^2/\text{с.}, (\text{или } a=238.55 \text{ м}^2/\text{сут.}).$$

Аппроксимирующее звено, описывающее статику и динамику гидравлического влияния добывающей скважины на гидролитосферный процесс, записывается в виде:

$$W_{a,s} = \frac{0.00039825}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot (x^2 + (1.1679167 \cdot y)^2)^{0.5}), (x^2 + y^2) \geq r_0; \quad (5)$$

$$W_{a,s} = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0), (x^2 + y^2) < r_0, \beta = (0.01673368)^{0.5},$$

$$\beta = \left( \frac{s}{0.002761} + 0.01673368 \right)^{\frac{1}{2}}.$$

При разработке месторождения, участок расположения добывающих скважин определяется с учетом дополнительных условий (рельефа местности, графиков пьезометрического уровня и др.). Положим, что определен участок расположения «п» добывающих скважин, который показан на рис. 3. Скважины располагаются по границе круга радиуса R.

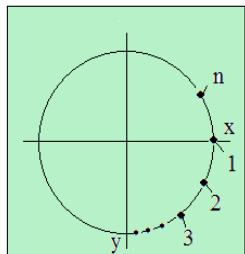


Рис. 3. Расположение добывающих скважин

## 2. Вычисление оптимального числа добывающих скважин

Постановка задачи оптимизации: для рассматриваемого месторождения требуется определить число добывающих скважин ( $n$ ) расположенных по периметру круга радиуса  $R=15\text{м}$ . (см. рис. 3) и обеспечивающих максимальный доход ( $\Delta D$ ) за десять лет эксплуатации месторождения. При этом будем полагать:

- добыча гидроминерального сырья осуществляется в течение 3650 суток;  $r_{0,i} = 0.2\text{м}$ . (радиусы колодцев);
- Ц-стоимость  $1\text{м}^3$  гидроминерального сырья составляет  $150/1000000$  млн. руб.;  $C_{sk}$  – затраты на обустройство и содержание одной скважины (в течение 10 лет эксплуатации) составляют 60 млн. руб.; налог на недропользование 7.5 %;  $P_z$  – постоянные затраты (в течении 10 лет эксплуатации) составляют 200 млн. руб.;
- значения понижений уровней ( $\Delta H_i$ ) в зонах расположения добывающих скважин  $\Delta H_i=1.5\text{ м}$ .

Влияние  $\gamma$ -й добывающей скважины на понижение уровня в  $i$ -добывающей скважине, в соответствии с (3), описывается соотношением:

$$\Delta H_i = \frac{K \cdot Q_i}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot (r_{0,i})) + \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{K \cdot Q_j}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot (r_{i,j})), \quad (6)$$

$$\beta = (D)^{1/2}, r_{i,j} = (x_i^2 + (K_p \cdot y_j)^2)^{0.5}, \quad i = 1, \dots, n.$$

Представляя (6) в векторном виде и преобразуя, получим

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ \dots \\ Q_\eta \\ \dots \\ Q_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1, C_{1,2}, \dots, C_{1,N} \\ \dots \\ C_{\eta,1}, C_{\eta,2}, \dots, C_{\eta,N} \\ \dots \\ C_{N,1}, C_{N,2}, \dots, C_N \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta H_1 \\ \dots \\ \Delta H_\eta \\ \dots \\ \Delta H_N \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Определим прибыль заданный срок эксплуатации (10 лет):

$$\Delta D = (Q \cdot \bar{C} - Q \cdot \bar{C} \cdot 0.075) \cdot 3650 - C_{sk} \cdot (n-1) \cdot P_z, \quad (8)$$

$$Q = \sum_{\eta=1}^N Q_\eta.$$

Полагая в (7)  $D=0.01673368$ ,  $K=0.00039825$ ,  $K_p=1.1679167$  и воспользовавшись разработанной в СУФУ программой расчета прибыли, определим оптимальное число добывающих скважин. По результатам расчетов построены графики, приведенные на рис.4.

Оптимальное число добывающих скважин равно семи, при этом суммарный дебит составит  $2424.66 \text{ м}^3/\text{сут.}$ , а прибыль 607.94 млн. руб. В табл. 1. приведены координаты добывающих скважин. Схема расположения скважин приведена на рис. 3.

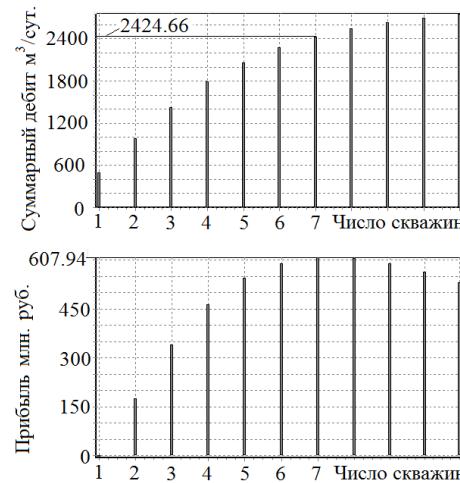


Рис. 4. График зависимости дебита и прибыли от числа добывающих скважин

ТАБЛИЦА 1. Координаты добывающих скважин

Номер добывающей скважины (i)	$x_i \text{ м.}$	$y_i \text{ м.}$
1	15.0	0.0
2	9.352347	11.72747
3	-3.337814	14.623919
4	-13.514533	6.508256
5	-13.514533	-6.508256
6	-3.337814	-14.623919
7	9.352347	-11.727472

## 3. Определение реакции объекта на выбранные пространственные моды

Гидравлическое взаимодействие  $n$  скважин описывается следующим соотношением (6), где:  $r_{i,j}$  – расстояние между  $i$  и  $j$  скважинами;

$$D=0.01673368; K=0.00039825; K_p=1.1679167.$$

Положим, что  $L_1 \cdot r_0 \approx L_1$ ,  $L_2 \cdot r_0 \approx L_2$ .

Запишем входное воздействие ( $Q$ ) и функцию выхода ( $\Delta H$ ) в виде векторов:

$$\Delta H = \begin{bmatrix} \Delta H_1 \\ \Delta H_2 \\ \vdots \\ \Delta H_N \end{bmatrix}_N, \quad Q = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_N \end{bmatrix}_N, \quad N = n, \quad (9)$$

Уравнение (6) может быть записано в виде:

$$\begin{bmatrix} \Delta H_1 \\ \dots \\ \Delta H_\eta \\ \dots \\ \Delta H_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1,1}, C_{1,2}, \dots, C_{1,N} \\ \dots \\ C_{\eta,1}, C_{\eta,2}, \dots, C_{\eta,N} \\ \dots \\ C_{N,1}, C_{N,2}, \dots, C_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_1 \\ \dots \\ Q_\eta \\ \dots \\ Q_N \end{bmatrix} \quad (10)$$

Полагая в матрице  $C s=j\omega$ ,  $\omega=0$ , получим матрицу статических коэффициентов передачи, которая будет использована при решении задачи определения реакции объекта на выбранные пространственные моды. Расстояние между скважинами составляет 13.0165 м. (рис. 5).

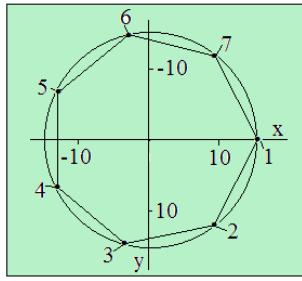


Рис. 5. Расположение скважин

Периметр ломаной линии соединяющей последовательно скважины составляет 91.1155м. Отрезок формирования пространственных мод показан на рис. 6.

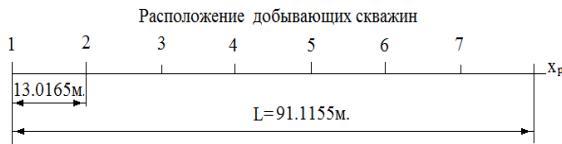


Рис. 6. Отрезок формирования пространственных мод

В соответствии с [1], пространственные моды выберем в виде:  $\cos(\psi_j \cdot x_p)$ ;  $\psi_j=2\pi \cdot j / L$ , где  $j$  – номер моды (рис. 6).

$$Q_i = \cos(\psi_j \cdot (i-1) \cdot 13.0165), \quad \psi_j = 2\pi \cdot j / 91.1155. \quad (11)$$

Учитывая (11), определим статические коэффициенты передачи объекта по пространственным модам (каждая пространственная мода реализуется с помощью семи добывающих скважин).

В [1] показано, что объект принадлежит к классу пространственно-инвариантных если пространственная мода, проходя через объект, не изменяет своей пространственной формы (коэффициенты передачи по пространственным модам, для всех точек входного воздействия и функции выхода [1] будут одинаковыми). В практике реализация пространственных мод осуществляется с помощью конечного числа исполнительных устройств (в рассматриваемом случае семи добывающих скважин). Это приводит к погрешностям в реализации пространственных мод и искажениям функции выхода. В рассматриваемом случае, при увеличении номера моды, такие погрешности возрастают.

#### 4. Определение динамической реакции объекта на выбранные пространственные моды

Полагая в матрице  $C s=j\omega$ , получим матрицу комплексных передаточных коэффициентов. В рассматриваемом случае входное воздействие на объект выберем в виде:

$$\cos(\psi_\gamma \cdot x_p) \cdot \sin(\omega_1 \cdot \tau); \quad \psi_\gamma = 2\pi \cdot \gamma / L,$$

где  $\gamma$  – номер моды (см. рис.6).

Входное воздействие на объект управления зададим в виде:

$$\tilde{Q}_i = A \cdot (\cos(\psi_\gamma \cdot (i-1) \cdot 13.0165)),$$

$$Q_i = \tilde{Q}_i \cdot \sin(\omega_1 \cdot \tau), \quad \psi_\gamma = 2\pi \cdot \gamma / 91.1155$$

( $A$  – амплитуда пространственной моды).

Уравнение (10) может быть записано в виде

$$\begin{bmatrix} \Delta H_1 \\ \dots \\ \Delta H_\eta \\ \dots \\ \Delta H_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{\gamma=1}^N C_{1,\gamma} \cdot \tilde{Q}_\gamma \\ \dots \\ \sum_{\gamma=1}^N C_{\eta,\gamma} \cdot \tilde{Q}_\gamma \\ \dots \\ \sum_{\gamma=1}^N C_{N,\gamma} \cdot \tilde{Q}_\gamma \end{bmatrix} \cdot A \cdot \sin(\omega_1 \tau). \quad (11)$$

Полагая:  $N=7$ ,  $D=0.01673368$ ,  $K=0.00039825$ ,  $K_p=1.1679167$ ,  $a=0.002761 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\omega_1=0.0002 \text{ 1/с}$ ,  $A=1$ , запишем комплексный передаточный коэффициент по первой пространственной моде входного воздействия  $Q_i$ ,  $\gamma=1$  (для первой добывающей скважины)

$$\Delta H_1 = \left( \sum_{\gamma=1}^7 C_{1,\gamma} \cdot \tilde{Q}_\gamma \right) \cdot A \cdot \sin(\omega_1 \cdot \tau) \rightarrow W_1(j\omega) = \sum_{\gamma=1}^7 C_{1,\gamma} \cdot \tilde{Q}_\gamma,$$

$$\tilde{Q}_\gamma = \cos(\psi_m \cdot (\gamma-1) \cdot 13.0165), \quad \psi_m = 2\pi \cdot m / 91.1155; \quad (12)$$

$$G = \psi_m^2,$$

где  $m$  – номер пространственной моды.

Аналогичное уравнение можно записать и для определения понижения уровня в других добывающих скважинах ( $\gamma=1..7$ ), для выбранных пространственных мод.

Была составлена программа для вычисления коэффициента  $K_m$ . В результате вычислений получено:  $m=1$ ,  $\omega_1=0.000$ ,  $G_1=0.004755$ ,  $K_1=0.003389$  – (понижение уровня в добывающей скважине (м.))/(дебит (м<sup>3</sup>/сут.)), (или  $K_1=292.198096$  (понижение уровня в добывающей скважине (м.))/(дебит (м<sup>3</sup>/с.))); полагая:  $m=1$ ,  $\omega_1=0.0002 \text{ 1/с}$ , был определен сдвиг по фазе (функция выхода относительно входного воздействия) для первой добывающей скважины  $\Delta\phi = -0.746713 \text{ рад.}$ ;  $m=3$ ,  $\omega_1=0.000$ ,  $G_3=0.042797$ ,  $K_1=0.002304$  – (понижение уровня в добывающей скважине (м.))/(дебит (м<sup>3</sup>/сут.)), (или  $K_1=199.0656$  (понижение уровня в добывающей скважине (м.))/(дебит (м<sup>3</sup>/с.))).

#### 5. Определение параметров аппроксимирующего звена

Выше было показано, что  $i$ -я пространственная мода входного воздействия (см рис. 6) записывается в виде:

$$Q_i = \cos(\psi_j \cdot (i-1) \cdot 13.0165), \quad \psi_j = 2\pi \cdot j / 91.1155$$

Для описания динамических характеристик объекта, используем аппроксимирующее звено вида:

$$W_a(s, G) = \frac{K}{\beta + 1} \cdot \exp(-\beta \cdot \Delta x_p), \quad \beta = \left( \frac{s}{a} + G \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (13)$$

$$G_1 \leq G \leq \infty.$$

$\Delta x_p$ , K , a – определяемые параметры.

Для выбранных пространственных мод, первой и третьей, значение обобщенной координаты соответственно равно:

$$G_1 = (2 \cdot \pi \cdot 1 / Lm)^2; G_3 = (2 \cdot \pi \cdot 3 / Lm)^2.$$

Записывая (13), при  $s=j\omega=0$ , для выбранных пространственных мод, получим:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{K}{\beta_1 + 1} \cdot \exp(-\beta_1 \cdot \Delta x) \\ K_3 = \frac{K}{\beta_3 + 1} \cdot \exp(-\beta_3 \cdot \Delta x), \\ \beta_v = (G_v)^{\frac{1}{2}}, v=1,3. \end{cases} \quad (14)$$

Подставляя исходные данные ( $K_1$ ,  $K_3$ ,  $G_1$ ,  $G_3$ ) в систему уравнения (14) и решая, придем к следующему результату:

$$K=357.264520; \Delta x_p=1.918098.$$

Полагая в (13)  $s=j\omega$  ( $\omega=\omega_1$ ), преобразуя, получим соотношение для вычисления фазы аппроксимирующего звена:

$$\begin{aligned} \Delta f_1 &= -\text{Im}(\beta_1) \cdot \Delta x_p - \arctan(\text{Im}(\beta_1) / (\text{Re}(\beta_1) + 1)), \\ \beta_1 &= (j\omega_1 / a + G_1)^2 \end{aligned}$$

Полагая  $\Delta f_1 = \Delta \phi = -0.746713$  рад.  $\omega_1 = 0.0002$  1/c., и решая приведенное выше соотношение численным методом, получим:

$$a=0.001254 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Передаточная функция звена, аппроксимирующего реакцию объекта на заданные пространственные моды, записывается в виде:

$$\begin{aligned} W_a(s, G) &= \frac{357.26452}{\beta + 1} \cdot \exp(-\beta \cdot 1.918098), \\ \beta &= \left( \frac{s}{0.001254} + G \right)^{\frac{1}{2}}, G_1 \leq G \leq \infty. \end{aligned} \quad (15)$$

### 6. Синтез распределенного регулятора

Используя приведенную в [1, 10] процедуру и программный продукт, разработанный в СКФУ, синтезируем распределенный регулятор, передаточная функция которого имеет вид:

$$\begin{aligned} W(x_p, s) &= E_1 \cdot \left[ \frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \cdot \left[ \frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{s} + \\ &+ E_2 \cdot \left[ \frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] \cdot s, \quad 0 < x_p < 91.1155 \quad (\text{см.рис.6}) \end{aligned}$$

В результате расчета были определены значения параметров распределенного регулятора:

$$n_1=1.870865, E_1=0.121163, n_4=2.043752, E_4=0.000214,$$

$$n_2=\infty, E_2=11.371567.$$

$$\begin{aligned} W(x_p, s) &= 0.121163 \cdot \left[ \frac{1.870865 - 1}{1.870865} - \frac{1}{1.870865} \nabla^2 \right] + \\ &+ 0.000214 \cdot \left[ \frac{2.043752 - 1}{2.043752} - \frac{1}{2.043752} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{s} + \\ &+ 11.371567 \cdot s, \quad 0 < x_p < 91.1155 \end{aligned} \quad (16)$$

Записывая (16) с использованием обобщенной координаты, получим:

$$\begin{aligned} W(G, s) &= 0.121163 \cdot \left[ \frac{1.870865 - 1}{1.870865} + \frac{1}{1.870865} \cdot G \right] + \\ &+ 0.000214 \cdot \left[ \frac{2.043752 - 1}{2.043752} - \frac{1}{2.043752} \cdot G \right] \cdot \frac{1}{s} + \\ &+ 11.371567 \cdot s, \quad G_1 \leq G \leq \infty \end{aligned} \quad (17)$$

### 7. Исследование устойчивости замкнутой системы

Используя (15) и (17), запишем передаточную функцию разомкнутой системы:

$$W_R(s, G) = W(s, G) \cdot W_a(s, G). \quad (18)$$

Полагая в (18)  $s=j\omega$ , для различных значений G, были построены амплитудные и фазовые частотные поверхности разомкнутой системы и определены линии среза модуля и фазы разомкнутой системы (рис. 7).

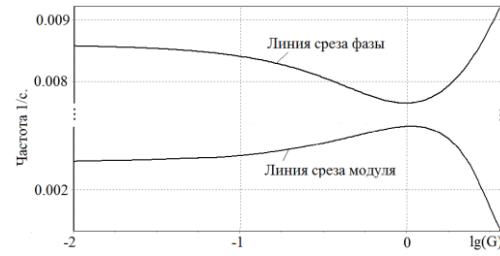


Рис. 7. Анализ устойчивости замкнутой системы

В соответствие с критерием устойчивости Найквиста, замкнутая система будет устойчива

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано звено, аппроксимирующее реакцию гиролитосферного процесса на изменение дебита добывающей скважины:

$$\begin{aligned} W_a(s) &= \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot (x^2 + (K_p \cdot y)^2)^{0.5}), \quad \beta = \left( \frac{s}{a} + D \right)^{\frac{1}{2}}, \\ (x^2 + y^2) &\geq r_0, \\ W_a(s) &= \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0), \quad \beta = \left( \frac{s}{a} + D \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (x^2 + y^2) < r_0. \end{aligned}$$

Если на вход этого звена подать воздействие (дебит добывающей скважины), то на выходе получим изменение уровня:

$$\Delta H(x, y, s) = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot (x^2 + (K_p \cdot y)^2)^{0.5}) \cdot Q; \quad \beta = \left( \frac{s}{a} + D \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (x^2 + y^2) \geq r_0, \quad (18)$$

$$\Delta H(x, y, s) = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0) \cdot Q; \quad \beta = \left( \frac{s}{a} + D \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (x^2 + y^2) < r_0.$$

Записывая (18) с использованием цилиндрических координат (см. рис. 8), получим:

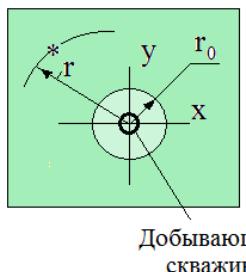


Рис. 8. Переход к цилиндрическим координатам

$$\Delta H(r, s) = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r) \cdot Q; \beta = \left( \frac{s}{a} + D \right)^{\frac{1}{2}}, r \geq r_0, \quad (19)$$

$$\Delta H(r, s) = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0) \cdot Q; \beta = \left( \frac{s}{a} + D \right)^{\frac{1}{2}}, r_0 > r.$$

Полученные уравнения (19) являются аналогами гидравлических уравнений, записанных в операторном виде. Параметры этих уравнений определяются с использованием результатов опытно-фильтрационных работ. Методика проектирования распределенных систем управления опирается на полученные выше уравнения и использует разработанные [1, 9] технологии систем с распределенными параметрами.

Решение задачи оптимизации числа добывающих скважин позволяет оценить перспективы освоения рассматриваемого месторождения. Как правило, в начальный момент обустраиваются одна или две добывающие скважины. По мере изучения потребности может быть расширено число добывающих скважин (например, при добыче артезианских вод). В работах [1, 9] рассмотрены различные варианты расположения добывающих скважин.

Используя оптимальное число добывающих скважин, осуществляется распределенное воздействие на объект управления. В рассматриваемом случае, задача проектирования системы управления решалась с использованием частотного метода, разработанного для систем с распределенными параметрами. Была определена статическая и динамическая реакция объекта на выбранные пространственные моды, а так же определены параметры распределенных звеньев, аппроксими-

рующих статические и динамические характеристики распределенного объекта. Полученное распределенное звено было использовано в методике синтеза распределенного регулятора и при исследовании устойчивости замкнутых систем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Першин И.М. Частотная концепция анализа и синтеза систем с распределенными параметрами. – Изд-во ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» Институт, сервиса, туризма и дизайна (филиал) СКФУ в г. Пятигорске. 357500, Ставропольский край, г. Пятигорск, ул. Московская, 31, 08.02.2021г. – 171 с. – ISBN 978-5-6045432-9-0.
2. Pershin I.M., Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems // Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Power Supply of Mining Companies. Сеп. "Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Power Supply of Mining Companies" 2017. – Р. 032029. – DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032029.
3. Drovosekova T.I., Pershin I.M. Peculiarities of modelling hydro-lithospheric processes in the region of Kavkazskie Mineralnye Vody (caucasus mineral springs) // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. – 2016. – Р. 215-217.
4. Першин И.М., Цаплева В.В., Носова В.А. Верификация дискретных моделей гидролитосферных процессов // Современная наука и инновации. – 2021. – Вып. № 4 (36). – С. 31-39.
5. Першин И.М., Носова В.А., Русак С.Н. Определение параметров распределенных звеньев, аппроксимирующих гидролитосферные процессы // Современная наука и инновации. – 2021. – Вып. № 2 (34). – С. 10-16.
6. Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Аппроксимационные модели передаточных функций распределенных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 126-138.
7. Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Методы аппроксимации передаточных функций распределенных объектов // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных трудов VII Всероссийской научной конференции. – 2015. – С. 106-117.
8. Малков А.В., Першин И.М., Помеляйко И.С. Проблемы экологической безопасности гидроминеральной базы курорта Кисловодск // Актуальные проблемы гидролитосферы (диагностика, прогноз, управление, оптимизация и автоматизация): Сборник докладов. Редакционная коллегия: Бородавкин П.П., Малков А.В., Першин И.М. – 2015. – С. 92-116.
9. Pershin I.M., Papush E.G., Malkov A.V., Kukharova T.V., Spivak A.O. Operational Control of Underground Water Exploitation Regimes // Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019. – 2019. – С. 77-80. – DOI: 10.1109/CTS48763.2019.8973323.

# Комплексный алгоритм управления технологическими процессами в газовой промышленности

**Абрамкин Сергей Евгеньевич**  
 Санкт-Петербургский государственный  
 электротехнический университет «ЛЭТИ»  
 им. В.И. Ульянова (Ленина)  
 Санкт-Петербург, Россия  
*seabramkin@etu.ru*

**Душин Сергей Евгеньевич**  
 Санкт-Петербургский государственный  
 электротехнический университет «ЛЭТИ»  
 им. В.И. Ульянова (Ленина)  
 Санкт-Петербург, Россия  
*dushins@yandex.ru*

**Аннотация.** Цель работы – усовершенствование процессов управления технологическими процессами в газовой отрасли. Задачи: анализ газодобывающего комплекса как объекта управления; разработка концепции управления на основе киберфизического подхода; внедрение комплексного алгоритма управления. Результаты: определены целевая функция управления и ограничения; состав комплексного алгоритма. Предложена концепция применения киберфизических систем. Приведен пример реализации комплексного алгоритма управления.

**Abstract.** The purpose of the work is the improvement of process control processes in the gas industry. Tasks: analysis of the gas production complex as a control object; development of a control concept based on a cyber-physical approach; introduction of a complex control algorithm. Results: the objective control function and restrictions are determined; composition of the complex algorithm. The concept of application of cyber-physical systems is proposed. An example of the implementation of a complex control algorithm is given.

**Ключевые слова:** комплексный алгоритм, автоматизированный газодобывающий комплекс, киберфизический подход, участок добычи, участок подготовки, участок транспортировки.

**Keywords:** complex algorithm, automated gas production complex, cyber-physical approach, production site, gas treatment area, gas transportation section.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в газовой отрасли реализуется концепция комплексной автоматизации технологических процессов (ТП). Она характеризуется внедрением автоматизированных технологических комплексов (АТК) основанных на внедрении малолюдных технологий, ресурсо- и энергосбережении, повышении эффективности производства [1].

Перспектива развития автоматизации и управления ТП газовой промышленности связана с разработкой и внедрением в производство киберфизических систем (КФС). Именно концепцию КФС целесообразно положить в основу создания и эксплуатации современных систем управления ТП [2]. С точки зрения киберфизического подхода АТК это совокупность совместно функционирующих физического объекта и распределенной

автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП), взаимодействие которых обеспечивается комплексным алгоритмом.

В [3] отмечено, что если АСУ ТП иерархически организована, то она является сложной. Так, АСУ ТП цеха по добывче и подготовке газа и конденсата газового можно представить в виде совокупности локальных систем управления отдельными аппаратами и системы комплексного управления технологическими процессами [3] (рис. 1).

На схеме (рис. 1) приняты следующие обозначения:  $f$  – возмущающее воздействие;  $y$  – управляемая переменная;  $S_1, S_2, \dots, S_n$  – локальные подсистемы управления;  $S_0$  – основная управляющая система;  $y_1, y_2, \dots, y_n$  – локальные управляемые переменные;  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$  – локальные энергетические управляющие воздействия;  $g_1, g_2, \dots, g_n$  – рассчитанные задающие воздействия для локальных систем управления;  $e_1, e_2, \dots, e_n$  – отклонения локальных переменных от заданных значений.

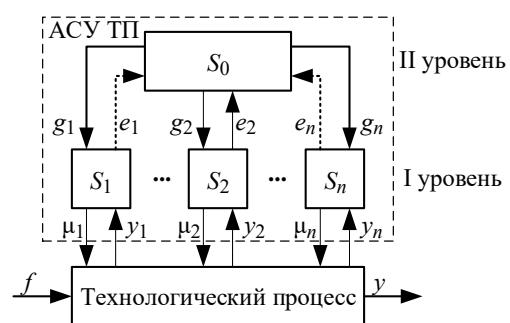


Рис. 1. Автоматизированный технологический комплекс с двухуровневой системой управления

Очевидно, что алгоритмы управления локальных подсистем  $S_1 \dots S_n$  не учитывают связей между отдельными физическими процессами. В связи с этим возникает проблема их координации. Сущность этой проблемы состоит в том, что необходимо разработать систему более высокого уровня иерархии  $S_0$ , которая будет управлять локальными подсистемами обеспечивая их согласованное функционирование и достижение общей целевой функции [3].

В данном случае в качестве объекта такого класса рассматривается автоматизированный газодобывающий комплекс (АГДК). В соответствии с [4] для этого класса объектов разрабатываются комплексные алгоритмы управления производительностью с учетом качественных показателей (содержание в газе капельной влаги и тяжелых углеводородов) и экономической целесообразности.

## II. АНАЛИЗ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Автоматизированный газодобывающий комплекс состоит из нескольких участков: участка добычи, участка подготовки, участка транспортировки [5] (рис. 2).

На рис. 2 принятые следующие обозначения: ГСК – газосборный коллектор; УКПГ – установка комплексной подготовки газа; НТС – низкотемпературная сепарация; ДКС – дожимная компрессорная станция; НСПК – насосная станция перекачки конденсата; МГ – магистральный газопровод; КП – конденсатопровод.

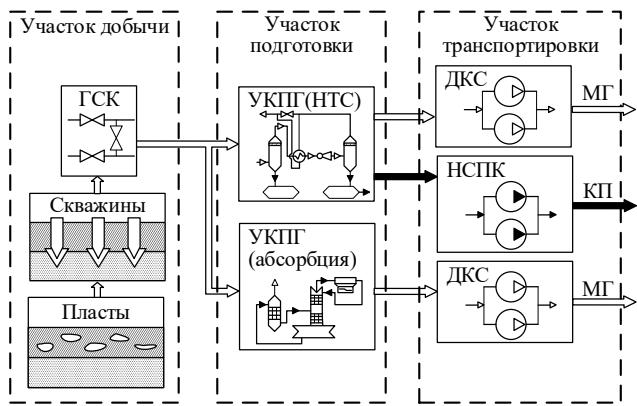


Рис. 2. Структурная схема АГДК

Из схемы видно, что АГДК – структурно-сложный объект. Основная трудность разработки комплексных алгоритмов управления АГДК – постоянное изменение его структуры. Например, при разработке чисто газового месторождения сначала вводятся объекты добычи и УКПГ, затем при необходимости станция охлаждения газа и в последнюю очередь ДКС. Для газоконденсатных месторождений в начале разработки вводятся объекты добычи, УКПГ и НСПК. В стадии падающей добычи – ДКС.

Выше отмечено, что целевая функция АГДК – обеспечение постоянной производительности газового (газо-конденсатного) промысла с учетом качественных показателей и экономической целесообразности в различные периоды разработки месторождения.

Структурная схема АГДК показывает его системные свойства. Очевидно, что система (АГДК) состоит из трех характерных для газодобывающего предприятия подсистем: добычи, подготовки и транспортировки. Эти подсистемы также могут быть разделены на отдельные элементы, которые кроме основной целевой функции, обеспечивают реализацию вспомогательных целей.

Основная целевая функция обеспечивается поддержанием в контрольных точках процесса определенных, технологическим регламентом, значений давления газа и углеводородного конденсата.

Вообще АГДК это территориально распределенная управляемая система. Организация управления такой системой сложная задача, характеризующаяся [6, 7]:

- наличием различных типов залежей и одновременно-раздельной добычей флюидов из нескольких пластов;
- рассредоточенностью объектов добычи (скважин) и их совместной работой на общий ГСК;
- неоднородностью и неопределенностью пластов;
- разнотипностью структур сбора и технологий подготовки газа (абсорбционная осушка газа, НТС);
- изменением структуры УКПГ во времени;
- наличием связи разнотипных УКПГ через обвязочный трубопровод;
- неравномерностью отбора газа потребителем.

Для управления АГДК необходима разработка комплексного алгоритма управления ТП. Создание такого алгоритма возможно на основе концепции киберфизических систем.

## III. КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ [8]

Покажем концепцию построения КФС в газовой отрасли на примере комплекса абсорбционной осушки природного газа (КАОПГ), входящего в состав УКПГ. Рассмотрим систему управления КАОПГ как новый объект проектирования и эксплуатации более высокого уровня иерархии. Он представляет собой физический объект, взаимодействующий со своей цифровой (компьютерной) моделью (ЦМ), иначе, цифровым двойником. Отметим, что ЦМ системы управления КАОПГ – неотъемлемая часть КФС. При этом физическая часть системы должна работать и в случае отсутствия (отключения) цифрового двойника. Таким образом, ЦМ системы управления КАОПГ можно представить как управляющее устройство для всей КФС, находящейся на более высоком уровне иерархии нежели локальный контроллер, предназначенный только для управления физическим объектом. Следовательно, функции модели расширяются до управляющей [2].

Важнейшей особенностью работы КФС в данном случае является динамическая взаимосогласованность физической системы (объект управления + локальный контроллер) и ее ЦМ в соответствии с поставленной целью управления. При этом она должна соблюдаться не только на этапе проектирования, но и непосредственно в процессе функционирования в режиме реального времени (эксплуатации). По сути, здесь уместно говорить о синергетическом подходе, – теории самоорганизации неравновесных процессов, – рекомендуемом к практическому применению на современном этапе развития теории управления [9]. Именно такое системное образование двух взаимосвязанных и взаимодействующих в режиме реального времени динамических подсистем, стремящихся к самоорганизации, представляет собой КФС.

Киберфизический подход на стадиях проектирования и эксплуатации систем управления предъявляет к моделям такие же требования, как и при решении задачи

идентификации объектов в составе общей процедуры синтеза систем управления. Здесь на основе критериев функционального подобия формируется целевая «близость» моделей к реальным (физическим) объектам. Таким образом, происходит разрешение системного парадокса Ротача. С целью повышения эффективности степень близости определяется на топологическом, структурно-операторном и параметрическом рангах неопределенности системы [10].

Согласованная работа физической системы (объекта) и ЦМ представлена на рис. 3. Измеренные и/или оцениваемые данные о состоянии физической системы (о динамической ситуации) сопоставляются с данными о состоянии ЦМ и в случае их несоответствия, производится коррекция ЦМ системы как в части модели объекта (т. е. осуществляется текущая идентификация объекта), так и в управляющей части (регулятора) модели. В свою очередь, по данным с ЦМ системы устройство идентификации и коррекции получает информацию для структурного синтеза или параметрической настройки контроллера (адаптация) либо формирования корректирующего сигнала физической системы. Ограничения на работу КФС связаны с временными затратами ЦМ на обработку входных данных и вычисления (моделирование процессов), которые практически не должны влиять на реальные ТП физической системы.

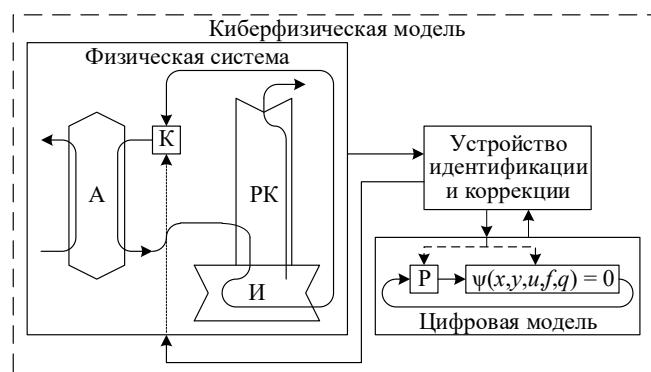


Рис. 3. Концептуальная схема киберфизической системы управления КАОПГ

На схеме приняты следующие обозначения: А – абсорбер; РК – ректификационная колонна; И – испаритель; К – контроллер физической системы; Р – регулятор цифровой модели.

В рамках концепции КФС необходимо решение задач разработки моделей управляемых процессов добычи, подготовки и транспортировки газа и конденсата газового.

При использовании киберфизического подхода допускается обработка больших данных, например, с помощью Data mining [11]. Они формируются в процессе всего жизненного цикла месторождения на основе измерений значительного количества переменных ТП. Повышения эффективности управления АГДК можно достичь, применяя концепцию многорежимного управления [12] в сочетании с информацией о режимах работы, хранящейся в базе данных. Она может быть основой для установления технологических режимов добычи газа для каждой установки. Однако на сегодняшний день не существует системы, которая позволяла бы эффективно обрабатывать и выдавать решения с целью управления АГДК.

#### IV. СОСТАВ КОМПЛЕКСНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ГАЗОДОБЫВАЮЩИМ КОМПЛЕКСОМ

В [4] представлен состав алгоритмов АГДК, формирующих комплексный алгоритм управления:

для участка добычи:

- алгоритм автоматического пуска и остановки скважины, куста газовых скважин с выводом их на заданный режим и поддержанием дебита или давления газа и ингибитора (гидратообразования или коррозии);
- алгоритм перехода из одного режима работы скважины в другой по заданию от АСУ ТП с автоматическим изменением расхода ингибитора в зависимости от значения дебита газа;
- алгоритм перехода из одного режима работы куста газовых (газоконденсатных) скважин в другой по команде из АСУ ТП с перераспределением расходов по скважинам с учетом ограничений (по дебитам скважин, давлениям) и изменением расхода ингибитора в зависимости от значения дебита газа;
- алгоритм пуска и остановки газосборного шлейфа в здании переключающей арматуры;
- алгоритм поддержания и перераспределения расхода газа по газосборным шлейфам;
- алгоритм поддержания давления газа в выходном коллекторе здания переключающей арматуры;

для участка подготовки газа:

- алгоритм пуска и остановки технологических линий;
- алгоритм стабилизации переменных технологического процесса;
- алгоритм перераспределения расходов газа по технологическим линиям;
- алгоритм поддержания качества товарного газа;
- алгоритм регулирования соотношения расходов «газ – абсорбент» для процесса абсорбционной осушки газа;
- алгоритм регулирования подачи ингибитора гидратообразования в ключевые точки установки НТС;
- алгоритм управления температурным режимом установки НТС;

для участка транспортировки:

- алгоритм проверки готовности к пуску газоподкачивающего агрегата (ГПА);
- алгоритм проверки защиты маслосистемы ГПА;
- алгоритмы пуска, нормальной и аварийной остановки ГПА;
- алгоритм перенастройки частоты вращения силовой турбины по команде от АСУ ТП;

- алгоритм стабилизации заданного режима ГПА в установившемся режиме;
  - алгоритм антипомпажного регулирования и анти-помпажной защиты нагнетателя.

Так же предусмотрена реализация алгоритмов технологических защит и системы противоаварийной защиты.

Анализируя вышеперечисленные алгоритмы можно сделать заключение, что они относятся к двум типам управления: позиционному и стабилизирующему. Первый тип управления относится в основном к операциям пуска и остановки ТП. Второй тип направлен на стабилизацию переменных ТП – уровня, давления, температуры и т. п.

Приведем пример реализации комплексного алгоритма управления ТП на газодобывающем предприятии, расположенном в районе Крайнего Севера.

## V. ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНОГО АЛГОРИТМА НА ГАЗОДОБЫВАЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ [18]

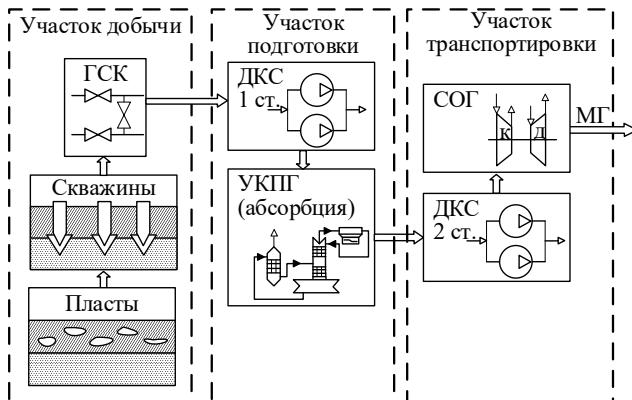
Реализация комплексных алгоритмов управления АГДК осложняется:

- интеграцией компонентов различных производителей, когда оборудование использует разные протоколы передачи данных;
  - обеспечением целостности информации, используемой для управления ТП;
  - обеспечением безопасного управления ТП.

Различные аспекты разработки алгоритмов управления ТП представлены в [13–17].

## *A. Автоматизированный газодобывающий комплекс как объект управления*

Автоматизированный газодобывающий комплекс в стадии падающей добычи состоит из участков: добычи, подготовки и транспортировки [5] (рис. 4).



*Рис. 4. Структурная схема газодобывающего комплекса в стадии падающей добычи*

На схеме (рис. 4) приняты следующие сокращения: ГСК – газосборный коллектор; ДКС – дожимная компрессорная станция; ст. – ступень; УКПГ – установка комплексной подготовки газа; СОГ – станция охлаждения газа; МГ – магистральный газопровод.

Участок добычи как объект управления представляет собой систему «газоносный пласт – скважина – газосборный коллектор» (рис. 5). На рис. 5 приняты следующие обозначения:  $p_g$ ,  $p_v$ ,  $p_{pl}$ ,  $p_3$ ,  $p_u$ ,  $p_{pc}$ ,  $p_{tgc}$  – соответственно давления горное, пластовых вод, пластовое, забойное, устьевое, переменное по стволу и в газосборном коллекторе; ФА – фонтанная арматура; Зд – задвижка; КР – кран регулирующий.

Управляемыми переменными данной системы являются устьевые давления  $p_y$ , давление на выходе газо-сборного коллектора  $p_{\text{гск}}$  и дебиты скважин  $Q_{\text{скв}}$ .

Управляющие воздействия осуществляются изменением проходных сечений кранов регулирующих.

Возмущающие воздействия характеризуются изменением расхода газа в ГСК  $Q_{ГСК}$  формируемое режимом работы газоперекачивающих агрегатов первой ступени компримирования, остановками скважин, изменением газоводяного контакта.

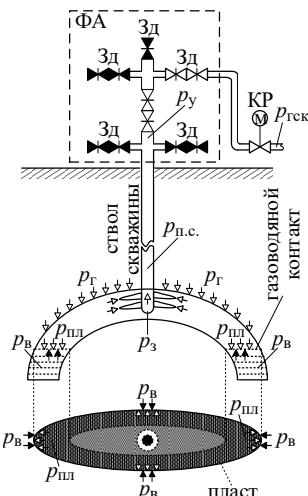


Рис. 5. Система «газоносный пласт – скважина – газосборный коллектор» как объект управления

От участка добычи природный газ поступает на участок подготовки на вход газоперекачивающего агрегата (ГПА) ДКС 1-й ступени, предназначенного для поддержания заданного давления газа в системе абсорбционной осушки газа (рис. 6). Следует отметить, что на участке транспортировки схема ГПА ДКС 2-й ступени идентична ГПА ДКС 1-й ступени.

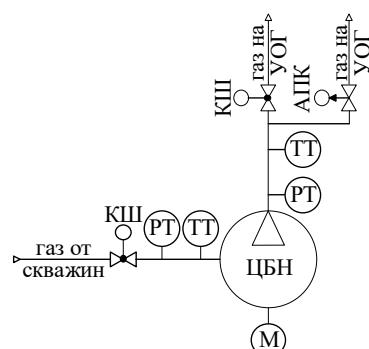


Рис. 6. Газоперекачивающий агрегат как объект управления

На рис. 6 приняты следующие обозначения: КШ – кран шаровой; ЦБН – центробежный нагнетатель; АПК – антипомпажный клапан; УОГ – установка охлаждения газа.

Управляемой переменной для ДКС 1-й ступени является давление во входном коллекторе цеха абсорбционной осушки газа, а для ДКС 2-й ступени – давление в МГ.

Управляющей переменной для ГПА является изменение числа оборотов ЦБН.

От ДКС 1-й ступени газ подается в цех подготовки газа к транспортировке (рис. 7). Здесь газ проходит через два аппарата: сепаратор и абсорбер. При этом из газа извлекаются механические примеси и капельная влага.

На рис. 7 приняты следующие обозначения: КлР – клапан регулирующий; рДЭГ – регенерированный диэтиленгликоль; нДЭГ – насыщенный диэтиленгликоль.

Управляемыми переменными для цеха являются расходы газа, рефлюкса и рДЭГа, уровни рефлюкса и нДЭГа.

Управляющие воздействия осуществляются изменением проходных сечений клапанов регулирующих.

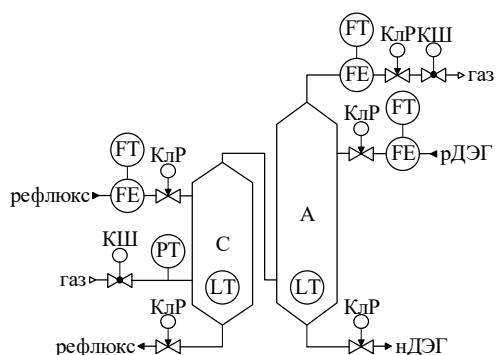


Рис. 7. Цех подготовки газа к транспортировке как объект управления

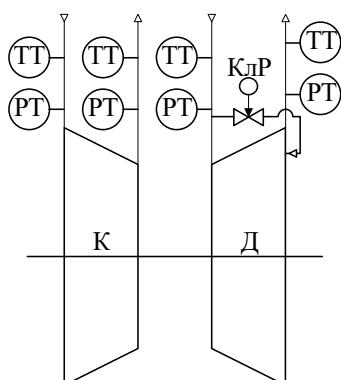


Рис. 8. Турбодетандерный агрегат как объект управления

После ДКС 2-й ступени газ поступает на СОГ для охлаждения в турбодетандерном агрегате (ТДА).

Управляемой переменной для ТДА является давление газа.

Управляющей переменной для ТДА является изменение числа оборотов ротора.

Возмущающим воздействием для участков подготовки и транспортировки является изменение расхода газа или давления газа в МГ.

Таким образом, из выше изложенного можно сделать вывод, что основной управляемой переменной процесса является давление газа. Его необходимо поддерживать на заданном уровне в узловых точках АГДК.

Автоматизированный ГДК является типичным объектом с неполной информацией и случайным изменением параметров. Ограничения на дебиты газа и жидкости по каждой скважине формируются из условия соблюдения нормального технологического режима с учетом состояния подземного оборудования, которые изменяются в процессе эксплуатации. Большое число управляемых объектов и отсутствие полной информации о состоянии газоносного пласта порождают случайные ситуации для АГДК.

Вообще управляемая система АГДК отличается иерархической структурой связей процессов добычи, подготовки и транспортировки газа. Эта система характеризуется взаимосвязью уровней иерархии как по каналам прямой связи, так и по каналам обратной связи. Задача организации комплексного управления АГДК учитывает ограничения на управляемые элементы в иерархической системе всех уровней.

#### B. Комплексный алгоритм управления АГДК

Из вышеизложенного, очевидно, что АГДК является структурно сложным и информационно насыщенным объектом управления, который состоит из взаимосвязанных технологических участков. В связи со сложностью описания режимов эксплуатации АГДК единым алгоритмом применен метод декомпозиции.

Для АГДК в стадии падающей добычи реализованы следующие алгоритмы:

- расчета граничных значений по дебиту скважин для участка добычи и расходу для участков подготовки и транспортировки;
- определения количества технологических линий (ТЛ), находящихся в работе на участках подготовки и транспортировки;
- автоматического пуска и остановки ТЛ на участках подготовки и транспортировки;
- перераспределения расходов по ТЛ цеха осушки газа;
- поддержания качества газа, подаваемого в МГ;
- формирования ограничений для СОГ и расчета количества работающих ТДА.

Ключевыми алгоритмами являются:

- алгоритм перераспределения расхода газа по ТЛ цеха осушки газа;
- алгоритм поддержания качества продукции.

##### a) Алгоритм перераспределения расхода газа

Этот алгоритм предназначен для поддержания общей производительности АГДК.

Алгоритм функционально состоит из двух частей:

- определения запасов до верхних и нижних ограничений каждой из ТЛ;

- непосредственно перераспределения заданий расходов для рабочих ТЛ.

Входной величиной алгоритма является суммарное измеренное значение расхода газа по ТЛ цеха осушки газа.

$$Q_{\text{АГДК}} = \sum_{i=1}^n Q_i.$$

$$Q_{\max} = \sum_{i=1}^n Q_{\max i}.$$

Выходными величинами являются задания на расходы по локальным контурам регулирования.

Ограничениями для цеха осушки газа являются максимальный и минимальный расход газа по одной ТЛ.

Запасом до ограничения принимается:

$$kQ_n = \frac{(Q_n^{\max} - Q_n^{\min}) - (Q_n - Q_n^{\min})}{Q_n^{\max} - Q_n^{\min}},$$

где  $n$  – номер ТЛ;  $Q_n^{\max}$ ,  $Q_n^{\min}$  – максимально и минимально допустимые расходы по ТЛ;  $Q_n$  – измеренный расход газа по ТЛ.

Алгоритм распределяет суммарный расход  $Q_{\text{АГДК}}$  только по участвующим в работе алгоритма ТЛ.

При равномерном перераспределении определяется задание по расходу для каждой работающей ТЛ:

$$UQ_n = \frac{UQ}{n}. \quad (1)$$

Если расчетное задание на расход по ТЛ больше максимально допустимого расхода на минус 1%, то значение, передаваемое на вход локального контура регулирования, принимается равным граничному условию  $(Q_n^{\max} - 0,01Q_n^{\max})$ . Если расчетное задание на расход по ТЛ меньше минимального расхода на плюс 1%, то значение, передаваемое на вход локального контура, принимается равным граничному условию  $(Q_n^{\min} + 0,01Q_n^{\min})$ .

При эксплуатации АГДК возникают ситуации, когда по не участвующей в работе алгоритма ТЛ идет расход газа. Учет этого фактора осуществляется путем определения граничного условия для алгоритма перераспределения:

$$UQ = Q_{\text{АГДК}} - Q_n.$$

где  $Q_{\text{АГДК}}$  – задание на суммарный расход по АГДК;  $Q_n$  – расход по не участвующей в работе алгоритма.

При увеличении или уменьшении задания по расходу  $Q_{\text{АГДК}}$  производится пуск или остановка одной резервной ТЛ. При этом осуществляется перераспределение задания на расход по работающим ТЛ. Резервная ТЛ выводится на заданное значение расхода или останавливается и происходит перераспределение потока газа по остальным работающим ТЛ. После вывода на режим или

остановки резервной ТЛ алгоритм осуществляет регулирование по остальным рабочим ТЛ в соответствии с рассчитанным по (1) заданием для клапанов регулирующих.

#### b) Алгоритм поддержания качества продукции

Данный алгоритм предназначен для поддержания качества газа, подаваемого в МГ. Показателем качества газа для АГДК является соответствие его требованиям СТО Газпром 089-2010 в части температуры точки росы по воде.

В состав системы регулирования подачи рДЭГа в качестве исполнительных устройств входят насосы плунжерного типа и клапаны регулирующие. Насосы осуществляют вывод на заданный режим общей подачи рДЭГа, клапаны регулирующие предназначены для точного распределения подачи рДЭГа по рабочим абсорберам.

Общая подача рДЭГа формируется из суммарного задания  $\sum_{n=1}^{10} UG_{PA_n}$  по подаче рДЭГа в абсорберы находящиеся в работе.

Если усредненный часовой текущий суммарный расход рДЭГа  $\sum_{n=1}^{10} \bar{G}_{\text{рДЭГ}_n}$  меньше суммарного задания по подаче  $\sum_{n=1}^{10} UG_{\text{рДЭГ}_n}$ , то с учетом работы насосов при  $0,3G_n$ , необходимо попеременно повышать производительность насосов с шагом  $h = 5\%$ , до уравнивания усредненного рДЭГа с заданием по подаче рДЭГа.

Если общий расход рДЭГа при достижении границы  $0,75G_n$  по всем находящимся в работе насосам не достигается, то выдается сообщение на АРМ оператора о включении дополнительного насоса. В обратном случае выдается сообщение на АРМ оператора об отключении одного насоса. После включения или отключения насоса автоматически производится выравнивание производительности оставшихся в работе насосов в диапазоне от  $0,3G_n$  до  $0,75G_n$  с шагом  $h = 5\%$ .

Расход рДЭГа в абсорбер одной ТЛ рассчитывается по формуле:

$$G_{\text{рДЭГ}_n} = UQ_n \cdot q_n,$$

где  $q_n$  – удельный расход рДЭГа на один абсорбер.

Оптимальная подача рДЭГа на одну ТЛ определяется экспериментально. Однако в процессе эксплуатации эта цифра может корректироваться. Коррекция подачи рДЭГа на одну ТЛ формируется исходя из условия:

$$UG_{\text{рДЭГ}_n} = G_{\text{рДЭГ}_n} - dG_{\text{рДЭГ}},$$

где  $dG_{\text{рДЭГ}} = G_{\text{рДЭГ}_n} - G_{\text{рДЭГопт}}$ .

Контроль температуры точки росы по воде осуществляется на газоизмерительной станции. В случае необходимости, по результатам измерения температуры точки росы, осуществляется ручная корректировка  $q_n$  и  $G_{\text{рДЭГопт}}$ .

Реализация комплексного алгоритма осуществлялась в течение года. Это связано с тем, что не применялся аппарат математического моделирования для опробования принятых решений.

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ АГДК как объекта управления с целью разработки комплексного алгоритма управления им.

На основе анализа определены:

- ограничивающие управление факторы, в частности, проблемой является изменение структуры АГДК в процессе эксплуатации;
- целевая функция системы управления АГДК – обеспечение постоянной производительности газового (газоконденсатного) промысла с учетом качественных показателей и экономической целесообразности в различные периоды разработки месторождения;
- состав комплексного алгоритма управления АГДК.

Предложена концепция применения киберфизических систем на примере комплекса абсорбционной осушки природного газа.

Приведен пример разработки комплексного алгоритма управления АГДК, эксплуатируемого на стадии падающей добычи. В частности, подробно описаны алгоритмы поддержания производительности АГДК и поддержания качества продукции, подаваемой в магистральный газопровод.

Установлено, что при разработке комплексного алгоритма практически не применяется аппарат математического моделирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Раушкин Ю.В. Автоматизация // Газпром. – 2008. – № 6. – С. 38-39.
2. Исмагилов Р.Н., Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Состояние и перспективы развития автоматизации установок комплексной подготовки газа на УНГКМ // Перспективные направления развития Уренгойского комплекса: Сб. науч. тр. ООО «Газпром добыча Уренгой». – М.: Недра, 2018. – С. 271-281.
3. Смилянский Г.Л., Амлинский Л.З., Баранов В.Я. и др. Справочник проектировщика АСУ ТП / под ред. Г.Л. Смилянского. – М.: Машиностроение, 1983. – 527 с.
4. СТО Газпром 2-2.1-1043-2016. Автоматизированный газовый промысел. Технические требования к технологическому оборудованию и объемам автоматизации при проектировании и обустройстве на принципах малолюдных технологий. – М.: Газпром экспо, 2016. – 31 с.
5. Абрамкин С.Е., Шустров Г.А., Душин С.Е., Мурзагалин А.Т., Яшкин А.Д. Проблемы разработки комплексных алгоритмов для объектов газовой промышленности // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2019. – № 5 (550). – С. 27-32.
6. Тараненко Б.Ф., Герман В.Т. Автоматическое управление газопромысловыми объектами. – М.: Недра, 1976. – 213 с.
7. Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Управление технологическими процессами газодобывающих комплексов // IX Всерос. науч. конф. «Системный синтез и прикладная синергетика»: Сб. науч. тр. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 412-421.
8. Абрамкин С.Е., Душин С.Е., Перухин Д.А. Проблемы разработки систем управления газодобывающими комплексами // Приборостроение. – 2019. – № 8. – С. 685-692. – DOI 10.17586/0021-3454-2019-62-8-685-692.
9. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – Ч. II. – 559 с.
10. Вавилов А.А. Структурный и параметрический синтез сложных систем. – Л.: Изд-во ЛЭТИ, 1981. – 95 с.
11. Майер-Шенбергер В., Куквер К. Большие данные. Революция, которая изменит то, как мы живем, работаем и мыслим. – М.: Мани, Иванов и Фербер, 2014. – 221 с.
12. Филимонов Н.Б. Концепция многорежимного регулирования // Автоматическое управление объектами с переменными характеристиками: Межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск: НЭТИ, 1988. – С. 88-92.
13. Ицкович Э.Л. Современные алгоритмы автоматического регулирования и их использование на предприятиях // Автоматизация в промышленности. – 2007. – № 6. – С. 39-44.
14. Веревкин А.П., Муртазин Т.М., Денисов С.В., Кирюшин О.В. Оперативное управление нефтехимическими процессами по показателям технико-экономической эффективности // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2021. – № 9-10. – С. 22-29.
15. Барашкин Р.Л., Горелов В.В., Калашников П.К., Попадько В.Е., Южанин В.В. Алгоритм взаимодействия программ имитационного моделирования и систем управления технологическими процессами // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2015. – № 10. – С. 35-40.
16. Абрамкин С.Е., Шустров Г.А., Душин С.Е., Мурзагалин А.Т., Яшкин А.Д. Проблемы разработки комплексных алгоритмов для объектов газовой промышленности // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2019. – № 5 (550). – С. 27-32.
17. Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Разработка комплексных алгоритмов для автоматизированных технологических комплексов // Проектирование и обеспечение качества информационных процессов и систем: Сб. докладов. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. – С. 58-61.
18. Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Реализация комплексных алгоритмов управления на газодобывающем предприятии // XXV Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2022): Сб. докладов. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – С. 83-86.

# Системы с согласно-параллельной коррекцией и оптимальное управление

**Афанасьев Иван Анатольевич**  
 Институт компьютерных технологий  
 и информационной безопасности  
 Южный федеральный университет  
 Таганрог, Россия  
*iafana@sfedu.ru*

**Аннотация.** В докладе рассмотрен способ построения оптимальных и близких к оптимальным по быстродействию систем на базе системы автоматического регулирования с согласно-параллельной коррекцией. Приведены результаты математического моделирования переходных процессов в оптимальных системах с инерционным объектом первого порядка без запаздывания и с запаздыванием и в системе, близкой к оптимальной, с объектом, имеющим распределённые параметры.

**Abstract.** The report considers a method for constructing optimal and close to optimal systems in terms of speed based on automatic control system with according parallel correction. The results of mathematical modeling of transient processes in optimal systems with a first-order inertial object without delay and with delay and in a system close to optimal, with object having distributed parameters are presented.

**Ключевые слова:** согласно-параллельная коррекция, оптимальная по быстродействию система, САУ, САР, управление.

**Keywords:** consonant-parallel correction, speed-optimal system, automatic control system, automatic control system, control.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Проблеме создания систем оптимального управления посвящен ряд фундаментальных работ [1–3], работ по синтезу систем, оптимальных по быстродействию [4], в том числе для объектов с распределенными параметрами [5–7]. Развитие вычислительной и микропроцессорной техники создало благоприятные условия для синтеза систем оптимального управления объектами с достаточно сложными динамическими характеристиками. В последние десятилетия появились десятки работ по созданию оптимальных и близких к оптимальным систем регулирования объектами как с сосредоточенными [6], так и с распределенными параметрами [7–9]. Значительное количество научных работ по оптимальному управлению свидетельствует о том, что данная проблема остается достаточно актуальной.

В данной работе рассмотрены способы построения оптимальных и близких к оптимальным систем управления на базе систем регулирования с согласно-параллельной коррекцией (СПК) [10].

## II. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О САР С СОГЛАСНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ

Поскольку сведения о САР (системы с автоматическим регулированием) с СПК (согласно параллельная коррекция) в литературных источниках появились совсем недавно [11] и о них даже не упоминается ни в одном из учебников, коротко остановимся на сущности того их вида, который используется в данной работе.

Обобщённая структурная схема САР с СПК изображена на рис. 1.

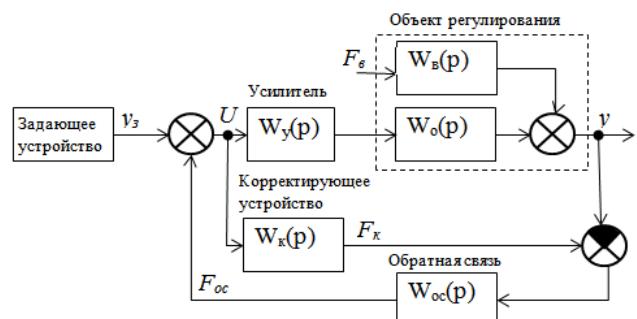


Рис. 1. Обобщённая структурная схема САР с согласно-параллельной коррекцией

Уравнение динамики, соответствующее изображённой структурной схеме, следующее:

$$[1 + W_y(p) * W_b(p) * W_{oc}(p) - W_k(p) * W_{oc}(p)] * y(p) = \\ W_y(p) * W_b(p) * y_z + W_b(p)[1 - W_k(p) * W_{oc}(p)] * F_b(p). \quad (2)$$

Здесь  $y(p)$  и  $F_b(p)$  – изображения регулируемой величины и возмущающего воздействия соответственно. Объект регулирования не должен содержать интегрирующих звеньев. Заменив в (1) передаточные функции соответствующими передаточными коэффициентами, получим уравнение статики САР:

$$[1 + k_y * k_b * k_{oc} - k_k * k_{oc}] * y = k_y * k_b * y_z + \\ k_b[1 - k_k * k_{oc}] * F_b. \quad (2)$$

Если установить произведение коэффициентов  $k_k$   $k_{oc}$  равным единице, то уравнение статики примет вид:

$$y = y_z/k_{oc} \quad (3)$$

т.е. при этом условии регулируемая величина пропорциональна задающему воздействию и статическая ошибка, вызванная любым возмущающим воздействием, равна нулю. Это первое положительное качество САР с рассматриваемой согласно-параллельной коррекцией. Второе положительное качество заключается в следующем. Из выражения (1) следует, что если знаменатель передаточной функции корректирующего устройства такой же, как у неизменяемой части системы, состоящей из усилителя и объекта регулирования (произведение  $W_y(p) W_o(p)$ ), то порядок инерционности замкнутой САР будет таким же, как у неизменяемой части системы совместно со звеном обратной связи. Заметим, что при исключении статической ошибки последовательным включением в систему интегрирующего звена (в системах с ПИ – регулятором) порядок инерционности САР увеличивается на единицу.

В дальнейшем, для упрощения записей, обратную связь будем считать безынерционной (считая регулируемой величиной сигнал на выходе датчика), с передаточным коэффициентом, равным единице. В этом случае передаточный коэффициент корректирующего устройства необходимо также принимать равным единице.

### III. ОПТИМАЛЬНАЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ САР С ИНЕРЦИОННЫМ ОБЪЕКТОМ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Для осуществления оптимального или близкого к оптимальному по быстродействию регулирования рассмотренную выше систему необходимо дополнить релейным элементом. Наиболее просто осуществить оптимальное управление, если неизменяемая часть системы представлена апериодическим звеном без запаздывания. Структурная схема САР, соответствующая этому случаю, изображена на рис. 2.

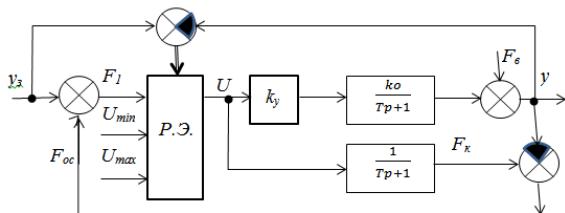


Рис. 2. Структурная схема оптимальной по быстродействию САР объектом, представленным апериодическим звеном первого порядка

Управляющим сигналом релейного элемента является сигнал рассогласования между заданным и текущим значениями регулируемой величины  $y$ . Характеристика релейного элемента следующая:

$$\left. \begin{array}{l} U = U_{max}, y_3 - y > \Delta y; \\ U = U_{min}, y_3 - y < -\Delta y; \\ U = F_1 = y_3 + F_{oc}, |y_3 - y| \leq \Delta y; \end{array} \right\} \quad (4)$$

Здесь  $\Delta y$  – зона нечувствительности реле.

Процесс выхода регулируемой величины на заданное значение при её нулевом начальном значении происходит следующим образом. При скачкообразной подаче задающего сигнала  $y_3$  на выходе релейного элемента  $U = U_{max}$ , регулируемая величина  $y$  и выходной сигнал корректирующего устройства  $F_k$  начинают расти по экспоненциальному закону с постоянной времени  $T_p$ .

Понятно, что в любой момент времени  $F_k = y / (k_o k_y)$ , т.к. у объекта регулирования и корректирующего устройства одинаковые постоянные времени. Как только наступает равенство  $y = y_3 + \Delta y$ , сигнал на выходе релейного элемента переключается на значение  $U = F_1$ , замыкается контур линейной САР. При  $y = y_3$  сигнал управления  $U = y_3 + (F_k - y) = F_k$ . Переходный процесс заканчивается, т.к. производные выходных сигналов объекта регулирования и корректирующего устройства становятся равными нулю:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dy}{dt} = \frac{k_y k_o U - y}{T} = \frac{k_y k_o F_k - y}{T} = \frac{\frac{k_y k_o y}{T} - y}{T} = 0 \\ \frac{dF_k}{dt} = \frac{U - F_k}{T} = \frac{F_k - F_k}{T} = 0 \end{array} \right\} \quad (5)$$

На выходе САР устанавливается заданное значение регулируемой величины

Аналогично протекает переходный процесс при отклонениях регулируемой величины от заданного значения, произошедших в результате возмущающих воздействий. Например, если при действии возмущения регулируемая величина стала больше заданного значения, на выходе релейного элемента  $U = U_{min}$ , в результате чего  $y$  и  $F_k$  начинают уменьшаться до наступления равенства  $y = y_3 + \Delta y$ , при котором происходит переключение сигнала на выходе релейного элемента и переходный процесс прекращается. Отличие от процесса выхода на заданное значение  $y$  состоит в том, что сигнал  $F_1 = F_k$  будет меньше на величину  $F_{oc} / (k_o k_y)$ .

Следует иметь в виду, что при отсутствии зоны нечувствительности релейного элемента в системе неизбежно возникнет колебательный процесс. Поэтому необходимо предусмотреть некоторое значение  $\Delta y$ , в пределах которого  $U = F_1$  и система работает как замкнутая линейная САР с согласно-параллельной коррекцией. Соответствующая релейная характеристика представлена на рис. 3,б. На рис. 3,а изображены полученные моделированием кривые переходных процессов в рассматриваемой САР

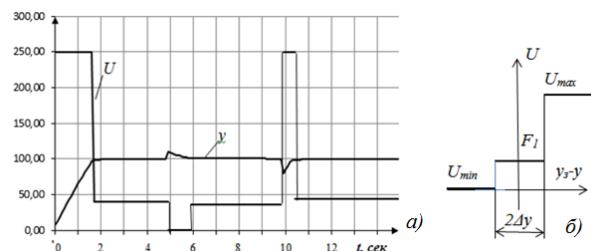


Рис. 3. Переходные процессы в оптимальной по быстродействию САР с объектом – апериодическим звеном без запаздывания и характеристика релейного элемента

Постоянная времени объекта регулирования при моделировании принята равной 10 сек. Зона нечувствительности реле  $\Delta y = 0.01 y_3$ . Как выход на заданное значение регулируемой величины, так и ликвидация отклонений, вызванных возмущающими воздействиями, происходят в оптимальном режиме до значения  $y = y_3 \pm \Delta y$ , т.е. при экстремальных значениях управляющего воздействия.

#### IV. ОПТИМАЛЬНАЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ САР С ИНЕРЦИОННЫМ ОБЪЕКТОМ ПЕРВОГО ПОРЯДКА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Более сложный релейный элемент необходимо применить для построения оптимальной САР при наличии запаздывания. Структурная схема такой САР представлена на рис. 4. В данном случае релейный элемент имеет два управляющих сигнала: сигнал рассогласования  $y_3 - y$  и разность между сигналом, пропорциональным задающему, и выходным сигналом корректирующего устройства:  $y/(k_o k_y) - F_k$ . Характеристика релейного элемента следующая:

$$\left. \begin{array}{ll} U = U_{\max}, & y < y_3 - \Delta y; \\ U = U_{\min}, & y > y_3 + \Delta y; \\ U = F_k, & |F_k - y/(k_o k_y)| \leq \Delta y_1; \\ U = F_1, & |y - y_3| \leq \Delta y; \end{array} \right\} \quad (6)$$

Предпочтение отдаётся каждому последующему неравенству

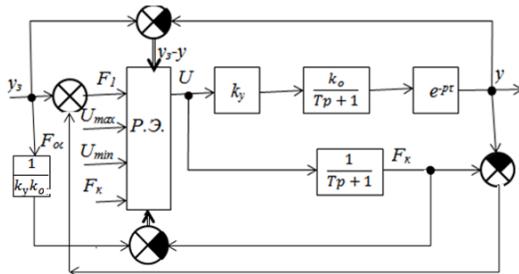


Рис. 4. Структурная схема оптимальной по быстродействию САР для объекта первого порядка с запаздыванием

Процесс выхода на заданное значение регулируемой величины происходит следующим образом. В момент скачкообразной подачи задающего воздействия  $y_3$  сигнал на выходе релейного элемента  $U = U_{\max}$ , сигнал  $F_k$  и сигнал инерционной части объекта регулирования (без учёта запаздывания) начинают расти по пропорциональным экспонентам, при достижении неравенства  $|F_k - y/(k_o k_y)| \leq \Delta y_1$  на выходе релейного элемента появляется управляющий сигнал  $U = F_k$ , при котором прекращается переходный процесс и в корректирующем устройстве, и в инерционной части объекта регулирования; соответственно, через время запаздывания прекратится переходный процесс на выходе объекта регулирования. Зону нечувствительности  $\Delta y$  необходимо принять во избежание колебательного процесса. Аналогично протекает переходный процесс при уменьшении задающего воздействия, только при этом начальным управляющим воздействием будет  $U = U_{\min}$ .

Для того, чтобы система реагировала на отклонения регулируемой величины, вызванные возмущающими воздействиями, в релейном элементе необходимо предусмотреть второе управляющее воздействие, представляющее собой рассогласование между заданным и фактическим значениями регулируемой величины, и при значении  $\Delta y$  подающим сигнал управления  $U = F_1$ . В пределах  $\pm \Delta y$  САР работает как линейная система с согласно-параллельной коррекцией. Величину  $\Delta y$  следует выбирать из ожидаемой величины тех отклонений, которые могут возникнуть при действии возмущений. Для ис-

ключения в линейной САР колебательных составляющих переходных процессов необходимо выполнить условие [10]:

$$k_o k_y \leq T/(\tau_e). \quad (7)$$

Для строк с формулами используйте стиль «Формула», в котором заданы позиции табуляции с выравниванием по центру (для формулы) и выравниванием по правому полю (для номера формулы).

На рис. 5 представлены кривые переходных процессов, полученные моделированием, при изменении задающего воздействия. Постоянная времени объекта регулирования – 5 сек, запаздывание – 1 сек. В начальный момент времени установлено  $y_3 = 100$ , при  $t=4$  сек  $y_3 = 200$ , при  $t=8$  сек  $y_3 = 100$ .

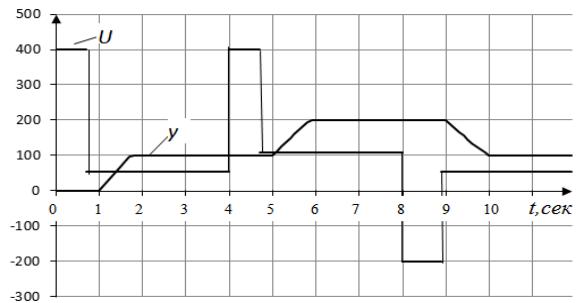


Рис. 5. Переходные процессы в САР, оптимальной по быстродействию, при изменении задающего воздействия

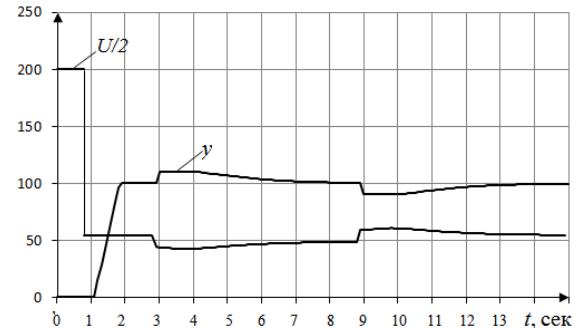


Рис. 6. Переходные процессы в САР при выходе на заданное значение регулируемой величины и при ликвидации отклонений, вызванных возмущениями (масштаб  $U_{\max}$  уменьшен вдвое)

На рис. 6 представлены кривые переходных процессов при выходе регулируемой величины на заданное значение и при подаче возмущающих воздействий. При моделировании установлена зона нечувствительности реле  $\Delta y = 20$ , при  $t=3$  сек возмущение вызвало скачкообразное увеличение регулируемой величины на 10 единиц, при  $t=9$  сек – скачкообразное уменьшение на 10 единиц. Ликвидация отклонений  $y$  от заданного значения при возмущениях происходит не в оптимальном режиме при значениях управляющего воздействия, значительно более низких, чем экстремальные, поэтому и скорость регулирования в этих случаях значительно ниже, чем при выходе регулируемой величины  $y$  на заданное значение.

## V. КВАЗИОПТИМАЛЬНАЯ САР УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ СТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

В рассмотренных системах автоматического регулирования объекты регулирования имеют идеализированные динамические характеристики. Характеристики реальных объектов, как правило, в той или иной степени отличаются от идеальных. В качестве примера рассмотрим САР, объектом регулирования в которой является объект с распределёнными параметрами – стальная пластина. Размеры пластины –  $L_x=L_y=0.2\text{м}$ ,  $L_z=0.05\text{м}$ ; регулируемая величина –  $T$  – температура в точке с координатами –  $x=y=0.1\text{м}$ ,  $z=0.02\text{м}$ ; управляющее воздействие – мощность теплового потока  $q$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , на поверхности  $[x,y,0.05]$ ; граничные температуры на остальных поверхностях примем нулевыми. Математическая модель тепловых полей пластины [12, 13]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (8)$$

где  $T(x,y,z,t)$  – температура в каждой точке пластины,  $x,y,z$  – пространственные координаты,  $t$  – время,  $a$  – температуропроводность материала пластины.

Границное условие для поверхности, на которую поступает тепловой поток [13]:

$$\lambda \frac{\partial T(x,y,0.05,t)}{\partial z} = q(x,y,t), \quad (9)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность материала пластины,

$q(x,y,t)$  – удельный тепловой поток, направляемый на поверхность пластины, который будем считать равномерным по всей поверхности.

Для стали  $a=0.000019\text{м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda=20.1\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$  [14].

Моделированием получена кривая изменения температуры в точке с координатами  $x=y=0.1\text{м}$ ,  $z=0.02\text{м}$  при скачкообразном увеличении теплового потока. В относительных единицах кривая представлена на рис. 7.

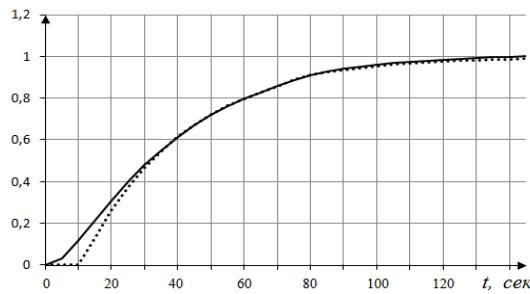


Рис. 7. Кривая разогрева пластины и аппроксимирующая её экспонента с запаздыванием

Передаточный коэффициент объекта регулирования

$$k_o = \Delta T / \Delta q = 0.000857 \text{ град}\cdot\text{м}^2/\text{Вт},$$

параметры аппроксимирующей кривой: постоянная времени  $\Theta=30.8\text{с}$ , запаздывание  $\tau=10.7\text{с}$ .

Систему автоматического регулирования строим в соответствии со структурной схемой рис. 4. Коэффициент усиления основного контура системы, равный в соответствии со структурной схемой  $k=k_0 k_y$ , вычисленный по выражению (7), равен 1.059. Таким образом, чтобы

переходные процессы в САР с согласно – параллельной коррекцией не имели периодической составляющей, коэффициент усиления усилителя

$$k_y \leq 1.059 / 0.000857 \approx 1235.$$

Моделирование переходных процессов в системе выполнено при следующих параметрах:  $k_y=900$ , зоны нечувствительности релейного элемента (см. (6))  $\Delta y=40\text{град}$ ,  $\Delta u=1\text{град}$ . В момент времени  $t=150\text{сек}$  температура охлаждаемых поверхностей пластины скачком увеличилась с 0 до 20 градусов. Кривые переходных процессов представлены на рисунке 8

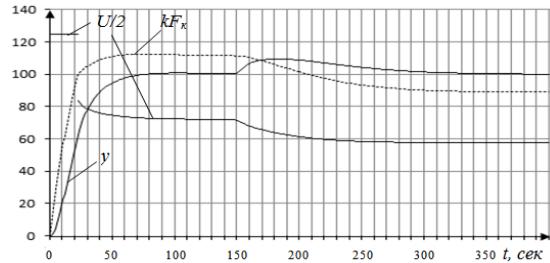


Рис. 8. Переходные процессы в САР при разогреве пластины и при увеличении температуры охлаждаемых поверхностей

Начальный разогрев происходил при максимальном управляющем воздействии до температуры 60 градусов, при достижении равенства  $y_{\max} - k * F_k = 1 \text{ град}$  релейный элемент отключил  $U_{max}$  и замкнул линейную систему регулирования. Заданное значение температура с точностью до 1% достигнуто через 70 секунд, перерегулирование составило 0.7%. При ликвидации отклонения регулируемой температуры, вызванное увеличением температуры охлаждаемых поверхностей, действовала линейная САР, экстремальные значения управляющего сигнала не использованы, поэтому переходный процесс протекает намного медленнее, чем при разогреве.

Для сравнительной оценки быстродействия рассмотренной САР выполнено моделирование системы регулирования тем же объектом, оборудованной ПИ – регулятором. Параметры регулятора рассчитаны по критерию апериодической устойчивости [15]. Кривые разогрева, полученные при использовании систем двух видов, представлены на рис. 9. В системе с ПИ – регулятором регулируемая величина достигла 99% заданного значения через 144 секунды, тогда как в рассмотренной близкой к оптимальной системе это время составило 70 секунд. Перерегулирование в обоих случаях практически одинаковое.

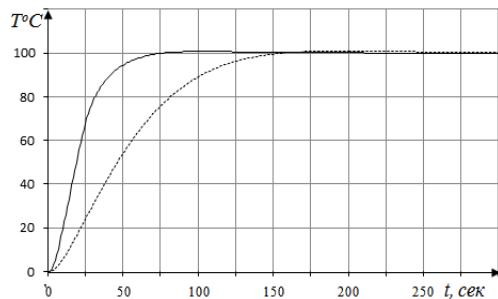


Рис. 9. Кривые разогрева пластины в квазиоптимальной системе (сплошная кривая) и в системе с ПИ – регулятором (пунктир)

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структурная схема САР с рассматриваемой согласно-параллельной коррекцией удобна для построения оптимальных и близких к оптимальным по быстродействию систем благодаря тому, что во время действия экстремальных значений управляющего сигнала одновременно формируется управляющий сигнал, соответствующий заданному значению регулируемой величины.

Для объектов с инерционностью первого порядка как без запаздывания, так и с запаздыванием САР рассмотренного вида при изменении задающего воздействия обеспечивают оптимальное по быстродействию регулирование, т.е. с максимально допустимым управляющим воздействием.

Для объектов регулирования, переходные характеристики которых аппроксимируются экспонентой первого порядка с запаздыванием, при изменении задающего воздействия рассмотренные САР обеспечивают быстродействие, значительно превышающее быстродействие систем с ПИ-регуляторами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Понtryгин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1976. – 392 с.
2. Фельdbaум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. – М.: Наука, 1966. – 623 с.
3. Лернер А.Я., Розенман Е.А. Оптимальное управление. – М.: Энергия, 1970. – 359 с.
4. Клюев А.С., Колесников А.А. Оптимизация автоматических систем управления по быстродействию. – М.: Энергоиздат, 1982. – 240 с.
5. Егоров А.И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами. – М.: Наука, 1978. – 463 с.
6. Добробаба Ю.П., Махова В.А., Миронюк С.Г. Трёхконтурная система автоматического регулирования положения исполнительного органа электропри-вода постоянного тока // Научные труды КубГТУ. – 2015. – № 5. – С. 145-152.
7. Суразетдинов Т.К. К теории оптимальных процессов с распределёнными параметрами // Автоматика и телемеханика. – 1964. – Т. 25, № 4. – С. 463-472.
8. Егоров А.И. Об оптимальном управлении в некоторых системах с распределёнными параметрами // Автоматика и телемеханика. – 1964. – Т. 25, № 5. – С. 613-623.
9. Ильина Н.А., Рапопорт Э.Я. Оптимальное по быстродействию управление нестационарным процессом теплопроводности с комбинированными внешними воздействиями по граничным условиям // Вестник Самарского Техн. Ун-та, техн. науки. – 2019. – № 2 (62). – С. 36-45.
10. Афанасьев Г.Д., Афанасьев И.Г. Согласно-параллельная коррекция в системах с сосредоточенными и распределёнными параметрами. – Пятигорск: Изд-во «РИА\_КМВ», 2019. – 128 с.
11. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. О проблеме согласно-параллельной коррекции систем регулирования // Механotronика, автоматизация, управление. – 2015. – Т. 16, № 8. – С. 507-512.
12. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
13. Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределёнными параметрами. – М.: Научный мир, 2012. – 473 с.
14. Теплохимический справочник. Т. 2. / под ред. В.Н. Юрнева, О.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976. – 896 с.
15. Корнилов Ю.Г. Теоретические основы автоматического регулирования. – Киев: Техника, 1965. – 425 с.

# Параметрическая идентификация процессов технологической теплофизики с двумя неизвестными характеристиками

Дилигенская Анна Николаевна

Институт автоматики и информационных технологий  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
технический университет»  
Самара, Россия  
adiligenskaya@mail.ru

Золотарёва Виктория Владимировна

Институт автоматики и информационных технологий  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
технический университет»  
Самара, Россия  
zolotarvika@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассматривается актуальная задача инженерной теплофизики: определение плотности граничного теплового потока в процессе внешнего нагрева объекта канонической формы по результатам измерения температуры в ограниченном множестве точек при учете неизвестного начального неравномерного распределения. Исследования основываются на математической модели процесса нестационарной теплопроводности с двумя входными воздействиями в условиях производственных режимов. Решение обратной задачи теплопроводности производится на основе методов теории оптимального управления объектами с распределенными параметрами. Поиск идентифицируемых величин осуществляется с помощью метода параметрической оптимизации, основанного на альтернансных свойствах искомых оптимальных решений. Итерационная процедура решения обратной задачи позволяет восстановить обе неизвестные характеристики процесса. Проведен анализ точности решения задачи при учете влияния начального распределения и без него.

**Abstract.** The actual problem of engineering thermal physics is considered in the paper. The density of the boundary heat flux in the process of external heating of an object of a canonical shape, taking into account the unknown initial non-uniform distribution, is determined from the results of temperature measurement. Experimental data were obtained at a limited set of points on the identification interval. The study is based on a mathematical model of the non-stationary heat conduction process with two inputs under technological environment. The solution of the inverse problem of heat conduction is carried out on the basis of methods of the theory of optimal control of objects with distributed parameters. The identified characteristics are sought using the parametric optimization method, which takes into account the alternance properties of the desired optimal solutions. An iterative procedure for solving the inverse problem makes it possible to recover both unknown characteristics of the process. An analysis of the accuracy of solving the inverse problem of heat conduction is carried out with and without the influence of the initial temperature distribution.

**Ключевые слова:** обратные задачи теплопроводности, объект с распределенными параметрами, идентификация, возмущающее воздействие, параметрическая оптимизация, альтернансные свойства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 0778-2020-0005.

**Keywords:** *inverse problem of heat conduction, object with distributed parameters, identification, disturbing influences, parametric identification, alternance features.*

## I. ВВЕДЕНИЕ

В ходе экспериментальных исследований нестационарных процессов теплопроводности возникают ситуации, когда непосредственное измерение физических характеристик процесса невозможно, и их необходимо восстанавливать по результатам измерений доступных величин. При исследовании процессов технологической физики, сопровождающихся теплообменными явлениями, получение максимально полной информации о наблюдаемом процессе сводится к идентификации начальных и граничных условий, уточнению математической модели объекта, определению теплофизических и геометрических характеристик объекта по их косвенным проявлениям [1–6].

Одним из возможных подходов к поиску идентифицируемых величин является решение обратных задач теплопроводности (ОЗТ), позволяющее определить неизвестные характеристики тепловой системы по результатам измерения температуры на заданном множестве точек. Разработка методов решения ОЗТ, позволяющих находить решения с заданной точностью с учетом реальных особенностей производственных процессов, по сегодняшний день остается одной из актуальных задач инженерной теплофизики.

Большую роль в разработке методов решения ОЗТ, не удовлетворяющих условиям корректности по Адамару, имеют работы О.М. Алифанова, Дж. Бека, В.А. Морозова, Ю.Е. Воскобойникова и других [7–9].

Значительное число различных подходов к решению обратных задач обусловили обширную классификацию методов их решения. Например, в работе [10] автор делит методы решения обратных задач теплопроводности на приближённые и точные, детерминированные и вероятностные, аналитические и численные. Одним из базовых методов решения ОЗТ, применяемых в настоящее время, является метод регуляризации Тихонова [4, 11], заключающийся в минимизации регуляризующего функционала, использующего параметр регуляризации и стабилизирующий оператор [1].

Эффективность решения обратных задач в значительной мере зависит от многих факторов: от точности построения математической модели рассматриваемого объекта с распределёнными параметрами (ОРП), задания начальных и граничных условий, теплофизических свойств материала. В реальных условиях ОРП подвергается внешним воздействиям, сигнальным и параметрическим возмущениям, что существенно влияет на полученную экспериментальную информацию, и как следствие, на результаты решения обратной задачи.

Данная работа посвящена исследованию решения граничной ОЗТ на основе минимаксной оптимизации искомых характеристик при учете неизвестного неравномерного начального распределения температур.

## II. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ

Одним из принятых подходов к идентификации неизвестных характеристик процессов теплопроводности на основе решения ОЗТ является параметрическая оптимизация, когда при заданной структуре математической модели в результате минимизации сформированного определенным образом критерия качества определяются модельные параметры [12]. Различные виды функционала оптимизации и разные методы организации поисковой процедуры приводят к большому числу методов параметрической идентификации.

Для решения базовых ОЗТ может быть применен метод последовательной параметризации, основная суть которого заключается в приведении исходной некорректно поставленной обратной задачи теплопроводности к условно-корректной за счёт сужения рассматриваемого множества решений до компактного, и в дальнейшем поиске последовательности приближенных решений, сходящихся к точному [13–16]. Параметризация искомых величин  $u(t)$ , при условии их принадлежности заданному классу гладких функций, с помощью вектора параметров  $a$  приводит к их параметрической форме  $u(t, a)$ , и далее, к параметризованному виду  $\theta(x, t, a)$  температурного поля  $\theta(x, t)$ .

Функционал оптимизации основывается на ошибке идентификации, формируемой в виде разности между экспериментальными температурными данными, полученными в некоторой фиксированной пространственной точке, и модельными, позволяющими рассчитать температуру в той же точке на том же временном интервале идентификации. В качестве модельной зависимости используется параметрическое представление температурного состояния. Оценивание температурного отклонения в равномерной метрике приводит к задаче математического программирования с минимаксным критерием оптимальности. Тем самым, исходная некорректно поставленная задача сведена к задаче параметрической оптимизации [12, 16].

Данный метод показал свою эффективность при решении линейных и нелинейных ОЗТ, заданных в одномерных и двумерных областях [13–16] для восстановления сосредоточенного, пространственно-распределенного или пространственно-временного воздействия. В практических ситуациях неизвестными величинами зачастую являются не одна характеристика процесса, а две или более функций. Наиболее типичный случай – когда помимо подлежащего идентификации граничного или внутреннего

воздействия объекта, также неизвестной характеристикой является распределение температуры в начальный момент времени.

Зачастую при решении граничных ОЗТ не учитывается неравномерное начальное распределение, являющееся, по сути, возмущающим воздействием и вызывающее отклонение в результатах идентификации. В работе проводится анализ решения граничной ОЗТ, на основе которого идентифицируется плотность теплового потока при наличии полной информации о начальном температурном распределении и в случае её отсутствия.

Рассматривается процесс нестационарной теплопроводности и исследуется задача оценивания граничного условия – плотности теплового потока  $q(t)$  – в условиях векторного входного воздействия

$$u = u_j, j = \overline{1, 2} = \{q(t), \theta_0(x)\}, \quad (1)$$

где  $\theta_0(x)$  – начальное температурное распределение по объему тела.

Задача идентификации решается на основе параметризации входных величин при условии их принадлежности заданному классу достаточно гладких функций. В результате параметризации с помощью вектора параметров  $a = (a^{(q)}, a^{(\theta)}) = \{(a_1^q, \dots, a_{N(q)}^q), (b_1^\theta, \dots, b_{N(\theta)}^\theta)\}$ , описание искомых характеристик сводится к виду

$$u^{(a^{(q)}, a^{(\theta)})} = u_j = \{(a_1^q, \dots, a_{N(q)}^q), (b_1^\theta, \dots, b_{N(\theta)}^\theta)\}. \quad (2)$$

Использование параметрической формы (2) входных величин приводит к параметризованному виду  $\theta(x, t, a^{(q)}, a^{(\theta)})$  температурного поля  $\theta(x, t)$ .

Основную сложность при решении ОЗТ с двумя неизвестными характеристиками представляет размерность искомого вектора параметров  $N = N^{(q)} + N^{(\theta)}$ , которая, в среднем, для получения удовлетворительной точности, вдвое превышает количество неизвестных при решении задачи с одной идентифицируемой функцией. Это приводит к существенным сложностям при численной реализации метода, и в статье предложен способ итерационного решения задачи, при котором на очередной итерации определяется одна из идентифицируемых характеристик  $u_j, j = \overline{1, 2}$  соответствующей размерности ( $N^{(q)}$  и  $N^{(\theta)}$ ).

## III. ЗАДАЧА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДВУХ ВЕЛИЧИН

Рассматривается процесс внешнего нагрева металлической пластины, состояние которой характеризуется переменным во времени и по объему тела температурным полем. В роли входных факторов выступают плотность теплового потока  $q(t)$  на поверхности  $x = R$  пластины и начальное распределение температур  $\theta_0(x)$ , рассматриваемые в качестве управляющего и возмущающего воздействий, соответственно [2]. Температурное состояние изменяется с помощью датчика  $D$  в некоторой фиксированной точке  $0 \leq x^* \leq R$  на интервале идентификации  $0 \leq t \leq t_k$ , в результате чего получена экспериментальная кривая  $\theta^*(t) = \theta^*(x^*, t)$ .

Процесс нестационарной теплопроводности в пластине представлен на рис. 1.

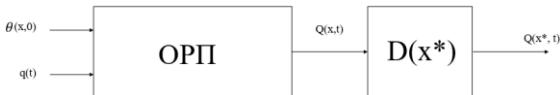


Рис. 1. Процесс нестационарной теплопроводности

В базовой ситуации рассматриваемый процесс нагрева описывается линейным однородным одномерным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial x^2}, \quad (3)$$

дополненным начальным

$$\theta(x,0) = \theta_0(x); \quad 0 \leq x \leq R \quad (4)$$

и граничным условием второго рода:

$$\frac{\partial \theta}{\partial x}|_{x=0} = 0; \quad \frac{\partial \theta}{\partial x}|_{x=R} = q(t). \quad (5)$$

Здесь  $x$  – вектор пространственных координат и  $t$  – время в относительных единицах.

При постановке обратной задачи теплопроводности полагается, что функция теплового потока  $q(t)$  и начальное температурное распределение  $\theta_0(x)$  являются неизвестными, и их необходимо определить по экспериментальным данным  $\theta^*(t)$ .

Для моделирования температурного состояния используется общее решение уравнения теплопроводности (3)-(5), записанное в интегральной форме

$$\theta(x,t) = \int_0^R G(x,\xi,t) \theta_0(\xi) d\xi + \int_0^t G(x,R,t-\tau) q(\tau) d\tau, \quad (6)$$

где  $G(x,\xi,t)$  – функция Грина, которая для рассматриваемого объекта принимает вид:

$$G(x,\xi,t) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cos(\pi mx) * \cos(\pi m\xi) * e^{-\pi^2 m^2 t}. \quad (7)$$

Поиск теплового потока и начального температурного распределения осуществляется в классе гладких полиномиальных функций, заданных заранее известными степенями многочленов  $N^{(q)}$  и  $N^{(\theta)}$  и соответствующими им векторами параметров  $a^{(q)}$  и  $a^{(\theta)}$ :

$$q(t) = \sum_{i=0}^{N^{(q)}} a_i^{(q)} t^i, \quad (8 \text{ а})$$

$$\theta^0(x) = \sum_{i=0}^{N^{(\theta)}} a_i^{(\theta)} x^i. \quad (8 \text{ б})$$

Тогда аппроксимирующие зависимости для теплового потока  $q(t) = q(t, a^{(q)})$  и начального температурного распределения  $\theta^0(x) = \theta_0(x, a^{(\theta)})$ , а, следовательно, и результатирующее температурное поле, полученное на основе (6), становятся функциями этих параметров.

Исходная некорректно поставленная ОЗТ записывается как задача оптимального управления с минимаксным критерием оптимальности:

$$I(a) = \max_{t \in [0, t_k]} |\theta(x^*, t, a) - \theta^*(t)| \rightarrow \min_a. \quad (9)$$

В полученной задаче, являющейся задачей параметрической оптимизации (ЗПО), необходимо найти такой вектор параметров  $a = \{a^{(q)}, a^{(\theta)}\}$ , чтобы на временном интервале  $t \in [0, t_k]$  выполнялось минимаксное соотношение (9) [3].

Решение задачи (9) основано на использовании специальных альтернативных свойств разности  $\theta(x^*, t, a) - \theta^*(t)$  [13, 17], для которой на интервале идентификации  $t \in [0, t_k]$  достигаются знакочередующиеся максимальные по абсолютной величине отклонения в некоторых точках  $t_j \in (0, t_k), j = 1, N$ , число  $N$  которых на единицу превышает число искомых параметров. На основании этого свойства составляется замкнутая система соотношений для предельных разностей температур в этих точках относительно всех неизвестных, дополненная условиями существования экстремума этой функции в точках, не совпадающих с границами интервала [3, 12, 15, 16].

Таким образом, ЗПО (9) сводится к замкнутой системе уравнений с  $N^{(q)} + N^{(\theta)} + 1$  искомыми величинами и вспомогательными неизвестными – координатами точек альтернативы, и её непосредственное решение является достаточно затруднительной процедурой, требующей априорной информации о начальных приближениях всех неизвестных величин.

Поэтому для решения полученной ЗПО (9) был использован итерационный подход, реализующий поочередное нахождение векторов  $a^{(q)}$  или  $a^{(\theta)}$ . Таким образом, на каждом этапе вычислений производится параметрическая оптимизация одной из искомых характеристик, а вторая функция считается известной из результатов расчета предыдущего этапа. При таком подходе число искомых параметров на каждом шаге соответствует количеству неизвестных в обратной задаче теплопроводности по определению единственной характеристики, и равно  $N^{(q)} + 1$  при определении  $q(t)$  или  $N^{(\theta)} + 1$  при поиске начального состояния  $\theta_0(x)$  [16].

Таким образом, для численного решения задачи произведена декомпозиция задачи (9) к двум независимым ЗПО

$$\varepsilon^{(q)} = \theta(x^*, t, a^{(q)}, \tilde{\theta}_0(x^*)) - \theta^*(t); \quad (10 \text{ а})$$

$$I(a^{(q)}) = \max_{t \in [0, t_k]} |\varepsilon^{(q)}| \rightarrow \min_{a^{(q)}}, \quad (10 \text{ б})$$

$$\varepsilon^{(\theta)} = \theta(x^*, t, \tilde{q}(t), a^{(\theta)}) - \theta^*(t); \quad (10 \text{ в})$$

$$I(a^{(\theta)}) = \max_{t \in [0, t_k]} |\varepsilon^{(\theta)}| \rightarrow \min_{a^{(\theta)}}, \quad (10 \text{ г})$$

каждая из которых предусматривает параметрическую оптимизацию одной из характеристик  $q(t, a^{(q)})$  или  $\theta_0(x, a^{(\theta)})$  в условиях, когда за другую функцию принимается её полиномиальная аппроксимация  $\tilde{\theta}_0(x)$  или  $\tilde{q}(t)$  с использованием найденных на предыдущем этапе коэффициентов.

Последовательная идентификация векторов  $a^{(q)}$  и  $a^{(\theta)}$  проводится до тех пор, пока разность между рассчитанными характеристиками на одном из очередных этапов (на  $i$ -ом шаге алгоритма) и на предыдущем не станет меньше априори заданной точности

$$|\theta^i(x^*, a^{(q)}, a^{(\theta)}, t) - \theta^{i-1}(x^*, a^{(q)}, a^{(\theta)}, t)| \leq \varepsilon_1. \quad (11 \text{ а})$$

Аналогично осуществляется проверка условий, и для идентифицируемых характеристик  $q(t, a^{(q)})$  и  $\theta_0(x, a^{(\theta)})$

$$q^i(t) - q^{i-1}(t) \leq \varepsilon_2, \quad (11 \text{ б})$$

$$\theta_0^i(t) - \theta_0^{i-1}(t) \leq \varepsilon_3. \quad (11 \text{ в})$$

На рис. 2. представлена схема последовательной идентификации в случае влияния двух входных воздействий – теплового потока и начального температурного распределения.

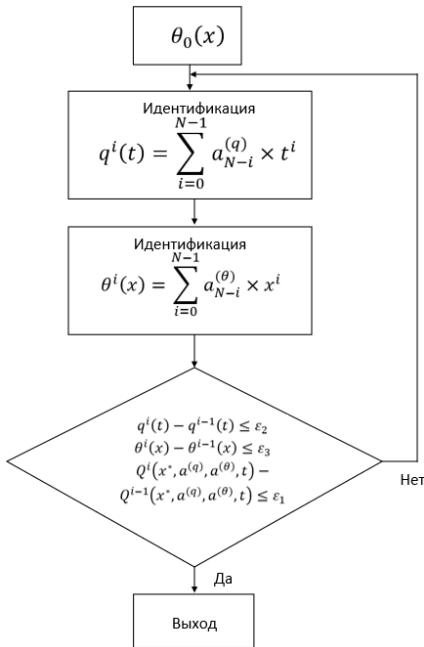


Рис. 2. Схема последовательной идентификации

При численной реализации алгоритма на нулевом этапе при отсутствии информации об идентифицируемых величинах решалась задача (10 а) по восстановлению плотности теплового потока, при этом величина  $\tilde{\theta}_0(x)$  принималась равной нулю. Далее итерационный процесс состоял из чередования этапов (10 а) и (10 б) определения одной из искомых функций при зафиксированном полиномиальном, найденном на предыдущем шаге, характере второй характеристики. Вычислительный процесс продолжался до достижения расширенного условия (11).

Точность идентификации искомых функций зависит от степеней аппроксимирующих полиномов  $N^{(q)}$  и  $N^{(\theta)}$ . Если точность решения, оцениваемая по ошибке аппроксимации, оказывается недостаточной, нужно увеличивать значения  $N^{(q)}$  и  $N^{(\theta)}$  и снова решать задачу в соответствии с описанным алгоритмом (рис. 2).

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ГРАНИЧНОЙ ОЗТ ПРИ НАЛИЧИИ ИНФОРМАЦИИ О НАЧАЛЬНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ И БЕЗ НЕЁ

Был проведен вычислительный эксперимент по определению неизвестных величин  $q(t)$  и  $\theta_0(x)$  на основе решения ОЗТ (3)-(5). В модельном эксперименте искомые зависимости  $q(t) = q^*(t)$  и  $\theta_0(x) = \theta_0^*(x)$  были приняты в виде экспоненциальных функций

$$q^*(t) = k_1(1 - e^{-\beta_1 t})$$

$$\theta_0(x) = k_2(1 - e^{-\beta_2 x}), x \in [0,1].$$

Тогда на основе (6) выражение для результирующего температурного поля принял вид:

$$\theta(x, t) = k_1 \left( t - \frac{1-e^{-\beta_1 t}}{\beta_1} \right) + 2k_1 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cos \left( \frac{\pi n x}{R} \right) \left( \frac{1-e^{-\pi^2 n^2 t}}{\pi^2 n^2} + e^{-\pi 2 n 2 t} - e^{-\beta_1 t} \pi 2 n 2 - \beta_1 + k_2 1 + \beta_2 2 e^{-\beta_2 t} - \beta_2 - 1 + 2 n = 1 \cos \frac{\pi n}{R} (\pi n x) e^{-\pi 2 m 2 \phi \times k_2 \sin \frac{\pi n}{R} (\pi m) \pi m} - e^{-\beta_2 t} - \beta_2 \cos \pi m + \pi m \right) \sin \frac{\pi n}{R} (\pi m) + \beta_2 \beta_2 2 + \pi 2 m 2. \quad (12)$$

Выражение (12) было использовано для проведения вычислительного эксперимента, в результате чего получены данные о температурной зависимости  $\theta^*(t) = \theta^*(x^*, t)$  в точке  $x^*$  на интервале идентификации  $0 \leq t \leq t_k$ , используемые далее, как экспериментальная информация.

Некоторые результаты решения граничной ОЗТ в классе полиномиальных функций при  $N^{(q)}=2$ ,  $N^{(\theta)}=3$  представлены на рис. 3–5.

Для оценки влияния возмущающего неравномерного начального состояния на точность идентификации  $q(t)$  было проведено исследование результатов решения обратных задач при учете информации о  $\theta_0(x)$  и в случае, когда действие начального распределения не учитывается. В этом случае при решении граничной ОЗТ  $\theta_0(x)$  полагается равным нулю.

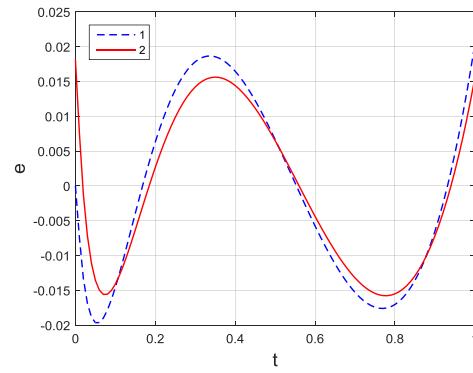


Рис. 3. График отклонения экспериментального температурного поля от восстановленного, при: (1) полном объеме информации, (2) неполном объеме информации

На рис. 3 представлены варианты конфигурации ошибки восстановления температуры  $\theta(x^*, t, a) - \theta^*(t)$  на интервале идентификации при  $N^{(q)}=2$  при учете влияния начального распределения и без него. Полученные результаты подтверждают выводы, что пренебрежение влиянием  $\theta_0(x)$  может приводить к изменению конфигурации кривой погрешности температуры и вызывать увеличение результирующей ошибки идентификации.

На рис. 4. приведены результаты по идентификации искомого граничного управления. Показано отклонение экспериментального теплового потока от восстановленного при наличии полного объема информации об исследуемом объекте и в условиях её отсутствия.

Графики экспериментального и восстановленного температурного поля при  $N^{(q)}=2$  в случае учета влияния начального распределения представлены на рис. 5.

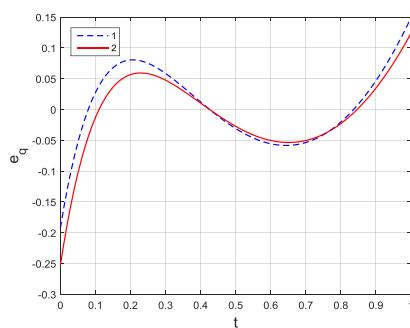
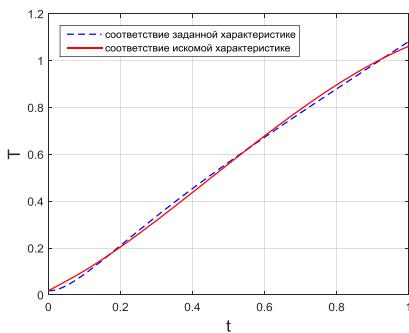


Рис. 4. График отклонения экспериментального теплового потока от восстановленного, при: (1) полном объеме информации, (2) неполном объеме информации



Сравнительный анализ максимальной абсолютной погрешности восстановления температуры и плотности теплового потока в классе полиномиальных функций при  $N=2, 3$ , в условиях полного объема информации и её отсутствия, приведен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Погрешность	С полным объемом информации, об исследуемом объекте	
	$N=2$	$N=3$
$\varepsilon(q)$	0,199	0,06
$\varepsilon(Q)$	0,02	0,006
С неполным объемом информации, об исследуемом объекте		
$\varepsilon(q)$	0,25	0,12
$\varepsilon(Q)$	0,015	0,005

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты анализа решения обратных задач теплопроводности с двумя неизвестными идентифицируемыми воздействиями демонстрируют важность учета влияния неравномерного начального температурного распределения, оказывающего эффект возмущения. Использование информации о начальном состоянии позволяет, как правило, уменьшить погрешность идентификации искомых характеристик.

Показана возможность решения подобных ОЗТ на основе их минимаксной параметрической оптимизации. Задача может быть решена на основе итерационной про-

цедуры, на каждом шаге которой определяется одна из идентифицируемых характеристик при зафиксированном характере найденной на предыдущем этапе другой зависимости. Предложенный подход приводит к уменьшению размерности искомого на очередной итерации вектора параметров при сохранении точности решения.

## ЛИТЕРАТУРА

- Мацевитый Ю.М., Прокофьев В.Е., Широков В.С. Решение обратных задач теплопроводности на электрических моделях. – Киев: Наук. думка, 1980. – 132 с.: ил.; 20 см.
- Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Упр. и информатика техн. системах". – М. : Высш. шк., 2003 (Казань: ГУП ПИК Идел-Пресс). – 298, [1] с. : ил., табл.; 21 см.; ISBN 5-06-004694-X (в пер.).
- Дилигенская А.Н., Самокиш А.В. Параметрическая идентификация в обратных задачах теплопроводности в условиях интервальной неопределенности на основе нейронных сетей // Вестник Самарского государственного технического университета, серия «Технические науки». – 2020. – Т. 28, № 4. – С. 6-18.
- Тихонов А.Н., Кальнер В.Д., Гласко В.Б. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990. – 264 с.
- Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 288 с.
- Япарова Н.М. Численное моделирование решений обратной граничной задачи теплопроводности // Вестник ЮУрГУ. Сер. Матем. моделирование и программирование. – 2013. – 6:3. – С. 112-124.
- Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
- Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
- Дж. Бек, Б. Блакузэлл, Ч. Сент-Клер, мл. Некорректные обратные задачи теплопроводности: пер. с англ. Е.А. Артюхина, И.И. Павловца / под ред. В.П. Мишина, О.М. Алифанова. – М.: Мир, 1989. – 310 с.: ил.; 25 см.; ISBN 5-03-000914-0 (В пер.): 4 р.
- Козодоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопро-водности. – М.: Наука, 1975. – 227 с.: черт.; 26 см. – (Технологическая теплофизика/ АН СССР. Науч. совет по проблеме "Новые процессы получения и обраб. metall. материалов". Отв. ред. акад. Н.Н. Рыкалин).
- Тихонов А.Н., О решении некорректно поставленных задач и методе регуляризации // Докл. АН СССР. – 1963. – 151:3. – С. 501-504.
- Мацевитый Ю.М. [и др.]. Параметрическая и функциональная идентификация тепловых процессов // Пробл. машиностроения. – 2011. – Т. 14, № 3. – С. 40-47.
- Дилигенская А.Н. Альтернативный метод оптимизации в коэффициентной обратной задаче теплопроводности // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. – 2014. – 4 (44). – С. 144-148.
- Дилигенская А.Н., Самокиш А.В. Прикладные аспекты минимаксной оптимизации в обратных задачах технологической теплофизики // X Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика».
- Дилигенская А.Н. Аналитическая идентификация пространственно-временного управления в обратных задачах теплопроводности на основе модального представления // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. – 2012. – № 4. – С. 31-38.
- Дилигенская А.Н., Рапопорт Э.Я. Аналитические методы параметрической оптимизации в обратных задачах теплопроводности с внутренним тепловыделением // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87, № 5. – С. 1082-1089.
- Ильинский А.И. Обратные задачи теплопроводности и теплофизический эксперимент // Лесной вестник (1997-2002). – 2000. – № 2. – С. 23-32.

# Синтез и адаптация регулятора для многомерного объекта

**Зайцев Сергей Владиленович**

Северо-Кавказский федеральный университет  
филиал в г. Пятигорске

(Институт сервиса, туризма и дизайна)

Ессентуки, Россия

*zaytsev.kmv@gmail.com*

**Жерносек Ирина Алексеевна**

Пятигорский медико-фармацевтический институт-филиал  
ФБУО ВО "Волгоградский государственный

медицинский университет".

Ессентуки, Россия

*IrinaGern@yandex.ru*

**Аннотация.** В данной статье рассмотрен синтез распределенного регулятора для многомерного объекта. Синтез распределенного регулятора производится через модально-временную матрицу объекта, полученную с использованием разложения реакции объекта с помощью рядов Фурье после модальных синусоидальных воздействий на входах. Из модально-временной матрицы определяем параметры объекта управления необходимые, для синтеза регуляторов. Затем можем произвести синтез одного из заданных регуляторов типа (Распределенный Высокоточный Регулятор (РВР), Распределенный Интегральный Регулятор (РИР) и Распределенный Дифференциальный Регулятор (РДР). Если синтезированный регулятор не позволит получить требуемые показатели качества, произведем его адаптацию во время работы для улучшения показателей качества регулирования.

**Abstract.** This article takes see synthesis regulators for multidimensional object. Synthesis multidimensional regulators base on method defining the parameters of the control multidimensional object across mode times matrix object with use inset-outset Fourier function. Use mode times matrix object after identification make synthesis regulators (distributed high-precision regulator, distributed izodrominis regulator, distributed differential regulator). If synthesis of DIR not have need quality parameter of regulation in work and its adaptation while working to improve the performance quality of regulation.

**Ключевые слова:** синтез распределенного регулятора; адаптивный распределенный регулятор; синтез регуляторов.

**Keywords:** regulator; distributed regulator; synthesis of regulators, Furies series.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В производстве наиболее широко используется пропорционально-интегро-дифференциальный (ПИД) регулятор, который выпускается различными российскими и зарубежными фирмами. Он имеют наилучшие показатели качества регулирования координатами технологического процесса. Репутация его с точки зрения надёжности, качества регулирования и простоты не оспоримы. Анализ различных систем ПИД-регуляторов приведен в литературе [1, 2]. Многие ПИД регуляторы имеют дополнительные функции; – адаптивной настройки, – предварительная фильтрация, – модификация структуры. Выполнение этих функций основывается на рассмотрении объекта как объекта с сосредоточенными параметрами, но в промышленности эксплуатируются системы с распределенными параметрами или много-

канальные. Такие системы не вполне отвечают требуемым показателям качества регулирования. Синтез и система адаптивного управления требует для них разработки новых методов. Распределённые системы являются взаимосвязанными, и передаточная матрица объекта часто не является диагонально доминантной, что и не позволяет произвести оптимальный синтез регулятора.

Для получения передаточной модально временной матрицы производим опыты по каждому каналу, подавая на каждый канал сигнал равный  $A = 0,1A_{\text{ном}}$ . Например, для 3х канальной системы:

– первый опыт  $C_1(x) = 0,2A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_1)$ ;

$C_2(x) = 0,1A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_2)$ ;  $C_3(x) = 0,1A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_3)$ ;

– второй опыт  $C_1(x) = 0,1A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_3)$ ;

$C_2(x) = 0,2A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_1)$ ;  $C_3(x) = 0,1A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_2)$

– третий опыт  $C_1(x) = 0,1A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_2)$ ;

$C_2(x) = 0,1A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_3)$ ;  $C_3(x) = 0,2A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_1)$

Получив оценки через разложение в ряд Фурье входных и выходных сигналов определяем параметры модели первой степени, имеющей вид:

$$W_{ig} = \frac{k_{ig}}{T_{ig}s + 1} e^{-\tau_{ig}s}. \quad (1)$$

$$\hat{a}_k = \frac{\hat{a}_{yi}\hat{a}_{ui} + \hat{\beta}_{yi}\hat{\beta}_{ui}}{\hat{a}_{ui}^2 + \hat{\beta}_{ui}^2} \quad \hat{\beta}_k = \frac{-\hat{a}_{yi}\hat{\beta}_{ui} + \hat{\beta}_{yi}\hat{a}_{ui}}{\hat{a}_{ui}^2 + \hat{\beta}_{ui}^2} \quad \text{где } i=1 \dots n$$

$$\hat{T}_{ig}^2 = \frac{(\hat{a}_{ig}^2 + \hat{\beta}_{ig}^2) - (\hat{a}_{gi}^2 + \hat{\beta}_{gi}^2)}{\Psi_i^2(\hat{a}_{gi}^2 + \hat{\beta}_{gi}^2) - \Psi_g^2(\hat{a}_{ig}^2 + \hat{\beta}_{ig}^2)}$$

$$\hat{k}_{ig0} = (\hat{a}_{ig}^2 + \hat{\beta}_{ig}^2) \hat{T}_{ig}^2 \Psi_g^2 + 1$$

$$\hat{\tau}_{ig} = \frac{1}{\Psi_i} \arctan \frac{\beta_i + \hat{T}_i \hat{a}_i \Psi_i}{\hat{a}_i - \hat{T}_i \hat{\beta}_i \hat{\Psi}_i} g \quad (2)$$

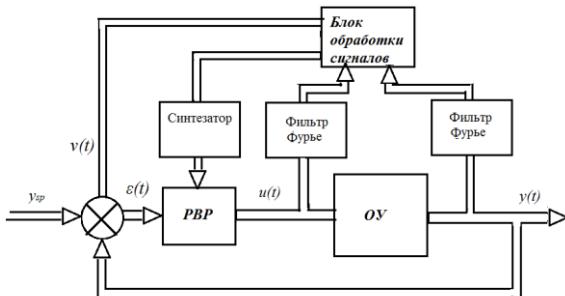


Рис. 1. Структурная схема PBP-регулятора

Количество испытаний должно соответствовать количеству каналов, а получив соответствующие оценки получим передаточную матрицу объекта. Передаточная матрица показана ниже.

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & \dots & W_{1j} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} & \dots & W_{2m} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} & \dots & W_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{l1} & W_{l2} & W_{l3} & \dots & W_{lj} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Из полученной матрицы (3) для синтеза системы желательно взять первую и последнюю моду объекта.

Передаточная функция РВР имеет вид:

$$W(G, s) = E_1 \left( \frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{G}{n_1} \right) + E_2 \left( \frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{G}{n_2} \right) s + E_4 \left( \frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{G}{n_4} \right) \frac{1}{s}, \quad (4)$$

где  $G$  – обобщенная координата;  $s$  – оператор Лапласа;  $n_1, n_2, n_4$  – весовые коэффициенты соответственно усиительного дифференцирующего и интегрального распределенных звеньев;  $E_1, E_2, E_4$  – коэффициенты пропорциональности соответственно усиительного дифференцирующего и интегрального распределенных звеньев.

Синтез РВР проведем по алгоритму изображеному на рис. 2 согласно литературы [3–5].

Процесс определения параметров регулятора аналогичен процессу синтеза регулятора. Сначала определяем частоту среза по каждому каналу управления, для чего пошагово изменяем частоту и определяем фазовый сдвиг системы, когда фазовый сдвиг достигнет значения фазы угла в соответствии с принятым запасом устойчивости по фазе ( $\Delta\varphi = \pi/6$ ), запомним соответствующую частоту среза по соответствующему каналу управления.

Выражение для определения частоты среза выглядит следующим образом:

$$(-\arctg(T_{i,i} \cdot \omega) - \tau_{i,i} \omega) = -\frac{5\pi}{6},$$

где  $T_{i,j}$  – постоянная времени по соответствующему каналу управления;  $\omega$  – текущая частота.

Затем определяем коэффициент усиления регулятора через коэффициент передачи объекта на этой частоте:

$$k_{y,i} = \frac{\sqrt{1 + (T_{i,i} \cdot \omega_{cpi})^2}}{k_{oi}},$$

где  $k_{y,i}$  – коэффициент усиления регулятора по соответствующей моде;

$\omega_{cpi}$  – частота среза для соответствующей моды;

$T_{i,i}$  – постоянная времени для соответствующей моды;

$k_{oi}$  – коэффициент передачи объекта по соответствующей моде.

В алгоритме приведенном в приложении Б переменные  $\omega_{cpi}, T_{i,i}, k_{oi}, k_{y,i}$  имеют соответствующие обозначения  $w_{si}, z_{ii}, k_{ii}, k_{ui}$

Затем определяем соотношения между параметрами на первой и третьей моде для коэффициентов усиления и частот среза на соответствующих модах, а также зону  $\Delta G$ :

$$dM = \frac{k_{y3}}{k_{y1}} ; \quad dw = \frac{\omega_{cp3}^2}{\omega_{cp1}^2} ; \quad D = \log(\omega_{cp1}) - \log(\omega_{cp3});$$

Если параметр  $dM > 1$ , то определяем коэффициенты  $E_1, n_1$  по формулам:

$$n_1 = \frac{-1 + dM - dMG_1 + G_3}{dM - 1} \text{ и } E_1 = \frac{k_{y1} n_1}{n_1 - 1 + G_1}.$$

Когда параметр  $dM < 1$ , тогда определяем коэффициенты  $E_1, n_1$  по формулам:

$$n_1 = \frac{-1 + dM - dMG_3 + G_1}{dM - 1} \text{ и } E_1 = \frac{k_{y1} n_1}{n_1 - 1 + G_1}.$$

В зависимости от параметра  $dw$  определяем коэффициенты  $E_2, n_2, E_4, n_4$ . Если  $dw > 1$ , то по формулам определяем:

$$n_4 = \frac{dw - 1 + G_3 - dw \cdot G_1}{dw - 1};$$

$$E_4 = \sqrt{\frac{(\omega_{cp1})^2}{(\frac{n_4 - 1 + G_1}{n_4})^2 \cdot 10^4}}; \quad K_4 = E_4 \left( \frac{n_4 - 1 + G_1}{n_4} \right); \quad E_2 = \frac{1}{10^4 K_4};$$

$$K_2 = \frac{1}{10^4 E_4}; \quad n_2 = \frac{-E_2 + E_4 G_1}{K_2 - E_2}.$$

Если  $dw < 1$ , то по формулам определяем:

$$n_2 = \frac{dw - 1 + G_3 - dw \cdot G_1}{dw - 1}; \quad E_2 = \sqrt{\frac{1}{(\frac{n_2 - 1 + G_1}{n_2})^2 \cdot 10^4 (\omega_{cp1})^2}};$$

$$K_2 = E_2 \left( \frac{n_2 - 1 + G_1}{n_2} \right); \quad E_4 = \frac{1}{10^4 K_2}; \quad K_4 = \frac{1}{10^4 E_2}; \quad n_4 = \frac{-E_4 + E_2 G_1}{K_4 - E_4};$$

После определения параметров объекта определяем параметры регулятора, согласно алгоритму, приведенному на рис. 2.

В алгоритме используются следующие сокращения:

$ws1 \dots ws3$  – частоты среза по соответствующим модам;

$h$  – шаг частоты для поиска частот среза;

$dM$  – отношение коэффициентов усиления регулятора соответственно первой и выбранной моде;

$dw$  – отношение квадратов частот среза первой и выбранной мод.

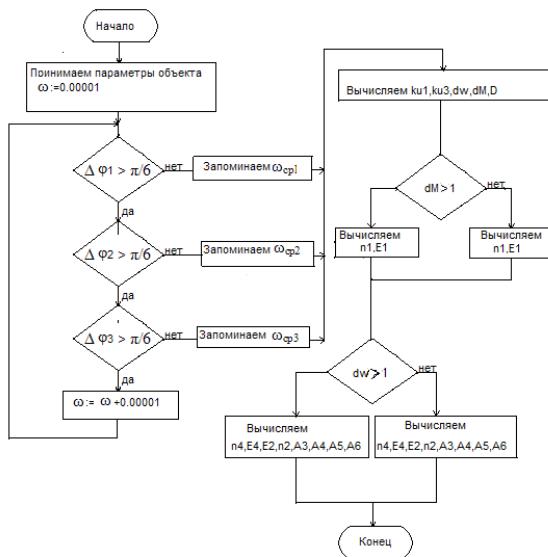


Рис. 2. Алгоритм определения параметров пространственного регулятора:  
 $E1, E2, E4, n1, n2, n4, A1, A2, A3, A4, A5, A6$  – параметры распределенного регулятора

После синтеза регулятора запускается нормальная работа регулятора и через определенное время определяются ошибка регулирования. Если полученный регулятор не имеет соответствующее качество регулирования заданным, то должна включиться программа адаптации.

Алгоритм адаптивной работы регулятора представлен на рис. 3.

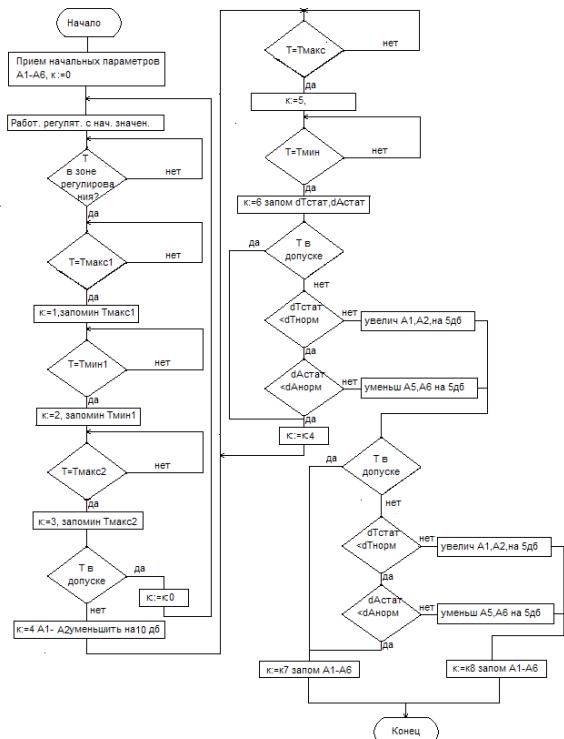


Рис. 3. Алгоритм адаптивной работы регулятора

В алгоритме программы, приведенном на рис. 3, приняты следующие обозначения:  $T2, T3, T4$  – текущая температура по соответствующему каналу управления;  $dT2, dT3, dT4$  – текущее отклонение температуры от заданной по соответствующему каналу управления;  $Am1-Am6$  – параметры регулятора, определенные программой определения параметров регулятора;  $i$  – метка перехода программы, определяющая значение параметров регулятора,  $i$  – порядковый номер параметра;  $dTi$  – параметр, который определяет достижение максимального отклонения амплитуды,  $i$  – порядковый номер параметра;  $TMaxi$  – параметр, определяющий максимальное положительное отклонение амплитуды колебаний,  $i$  – порядковый номер параметра;  $TMini$  – параметр, определяющий максимальное отрицательное отклонение амплитуды колебаний,  $i$  – порядковый номер параметра;  $dTAi$  – параметр, определяющий амплитуду колебаний температуры в зоне туннельной печи;  $dTcti$  – параметр, определяющий статическую ошибку температуры в зоне туннельной печи.

## II. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данную методологию желательно применять, когда объект не обладает свойствами диагональной доминантности передаточной матрицы и система не пространственно инвариантна, что позволяет уменьшить колебательность выходного параметра. Реализация такой системы управления реализована с использованием ПЛК (программируемого логического контроллера), а также с использованием микро ЭВМ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А.Г. Паленов М.В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД регуляторов в технических системах // Труды участников конференции УКИ'12. Научное издание. Электрон. текстовые дан. – М.: ИПУ РАН, 2012. – С. 36-48.
2. Александров А.Г. Паленов М.В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД регуляторов в технических системах // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 2. – С. 16-30.
3. Першин И.М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. – Пятигорск: Изд-во РИА КМВ 2007. – 244 с.
4. Першин И.М. Синтез систем с распределенными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 6. – С. 2.
5. Воронин А.Ю., Зайцев С.В. Синтез пространственного регулятора тепловой камеры пищевого производства // Системный анализ и прикладная синергетика: тезисы доклада на 4 международной конференции, г. Пятигорск, 2011. – С. 194-199.
6. Зайцев С.В. Методика адаптивной настройки РВР// Материалы Всероссийской научной конференции «Вузовская наука Северо-Кавказскому федеральному округу» Т 3 (часть 1), – Пятигорск: ФГАОУ ВПО СКФУ филиал в г. Пятигорске, 2013. – 215 с.

# Задачи управления и наблюдения конформационной динамикой молекул ДНК

**Илюхин Александр Алексеевич**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[aleilykhin@yandex.ru](mailto:aleilykhin@yandex.ru)

**Тимошенко Дмитрий Владимирович**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[dmitrytim@sfedu.ru](mailto:dmitrytim@sfedu.ru)

**Аннотация.** Рассматривается концептуальный подход к задаче управления пространственными конфигурациями молекул ДНК. Работа носит проблемный характер и является обобщением исследований авторов в области моделирования поведения и структуры ДНК методами теории упругости и механики деформируемого твердого тела. Предметом исследований в настоящей работе служит вопрос о применимости методов теории управления к объекту живой природы. Рассматриваются как вопросы управляемости на примерах влияния параметров молекулы на ее конфигурацию, так и вопросы наблюдаемости и идентификации параметров молекулы, исходя из видимой конфигурации в естественной среде. Предлагаемый подход согласуется с современными тенденциями в области молекулярного моделирования в биофизике и физико-химической биологии и представляется перспективным в решении задач управления генетическими и биохимическими процессами с участием ДНК.

**Abstract.** A conceptual approach to the problem of controlling the spatial configurations of DNA molecules is considered. The work is of a problematic nature and is a generalization of the authors' research in the field of modeling the behavior and structure of DNA by methods of the theory of elasticity and mechanics of a deformable solid body. The subject of research in this paper is the question of the applicability of the methods of control theory to an object of wildlife. Both issues of controllability are considered using examples of the influence of molecular parameters on its configuration, as well as issues of observability and identification of molecular parameters based on the visible configuration in the natural environment. The proposed approach is consistent with modern trends in the field of molecular modeling in biophysics and physicochemical biology and seems promising in solving the problems of controlling genetic and biochemical processes involving DNA.

**Ключевые слова.** управление конформациями ДНК, упругий стержень, идентификация параметров динамических систем.

**Keywords.** control of DNA conformations, elastic rod, identification of parameters of dynamic systems.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В работе рассматривается общая постановка и методология решения задачи управления пространственными конфигурациями макромолекул биологического происхождения, в первую очередь молекулами ДНК.

Получение заданной пространственной конфигурации (или, в терминах молекулярной динамики, конформации) молекулы ДНК имеет исключительное значение в таких областях как генная терапия и клеточная меди-

цина. Это связано с тем, что одним из объективных и общепризнанных свойств молекулы ДНК, отвечающих за передачу наследственной информации, является последовательность и периодичность в молекуле ее базовых элементов – нуклеотидных оснований, – а также структурный состав этих элементов. Физическое объяснение важности этих свойств состоит:

- в слабом взаимодействии этих оснований (близкодействии);
- в определяющем свойства молекулы синтезе соответствующих электромагнитных полей;
- движении свободных электронов в молекуле под действием внешних факторов и формирующем изменения во внутреннем взаимодействии, что приводит к появлению новых конформаций (естественное равновесие внутреннего взаимодействия).

В связи с тем, что изменение конформаций молекулы приводит к изменению взаимного положения частиц молекулы, а, следовательно, к появлению новых близкодействующих участков и возможному исчезновению подобных участков, имевших место в прежней конформации, можно говорить о новых свойствах молекулы как следствии изменившегося электромагнитного поля, определяемого конфигурацией составляющих.

Таковы в общих чертах физические процессы, связанные с изменением конформации ДНК. Эти процессы, в свою очередь, лежат в основе передачи генетической информации и регулирования биохимических процессов внутри клетки

Описанные процессы показывают необходимость исследования конформаций молекулы, о чем свидетельствуют многочисленные работы, лишь малая часть которых приведена в списке источников [1–8].

Другой важной задачей является определение зависимости от конформаций внутренних параметров молекулы [9–11]. Влияние изменений значений параметров молекулы на конкретный вид ее конформации дает возможность через эти параметры влиять на конформации, устанавливать определенный их вид с соответствующими свойствами молекулы.

В то же время описанный процесс изменения электромагнитных характеристик молекулы в зависимости от изменения ее пространственной конформации наводит на

мысль об использовании этого естественного процесса в качестве канала управления конформацией молекулы. Механизм управляющего воздействия представляется достаточно тривиальным: генерация электромагнитных полей заданных характеристик в пространственной окрестности, окружающей молекулу, что вызовет изменение электронного баланса внутримолекулярных структур, в свою очередь приводящее к изменению пространственной конфигурации молекулы в целом.

В отличие от традиционно рассматриваемых в теории управления технических систем, ДНК является объектом живой природы. Поэтому в первую очередь необходимо предложить обоснованную парадигму исследования, в рамках которой можно было бы построить математическую модель макромолекулы как объекта управления и указать соответствующие управляющие параметры.

В качестве такой парадигмы предлагается теория упругости, и соответственно в качестве модели объекта рассматривается модель деформируемого упругого тела.

Предварительным соображением, говорящим в пользу этого подхода, является распространение практики проведения компьютерного моделирования отдельных молекул и их систем не в рамках аппарата квантовой механики, наиболее полно описывающей строение вещества, а используя набор допущений и приближений, упрощающих природу процесса, но позволяющих решить задачу в целом.

Одним из ключевых допущений подобного рода является гипотеза о представимости молекулы в виде упругого тела, которое может быть подвергнуто сосредоточенным либо распределенным силовым воздействиям. В настоящей работе авторами взято за основу представление молекулы в качестве одномерного объекта – упругого стержня, что позволяет применить результаты предыдущих работ авторов [12–16] в области моделирования молекулярных систем методами теории упругости к задаче управления конфигурациями молекул.

Впервые данный подход был предложен в работах Д. Хёрста и Р. Бенхема [2, 3], которые рассматривали молекулу ДНК в виде упругого стержня, равновесные состояния которого описываются классической системой уравнений Кирхгофа-Клебша. И хотя такой подход, на первый взгляд, содержит заметную долю примитивизма, на практике он обладает потенциалом существенно продвинуться в решении задач молекулярного дизайна и, в частности, в области конформационного анализа. Это связано с тем, что слабостью утвердившихся в настоящее время в молекулярном дизайне методов (например, метод эмпирических силовых полей, метод молекулярной динамики или метод Монте-Карло) является то, что практически всегда уравнения, осуществляющие переход от молекулярных параметров к свойствам вещества то есть к макроскопическим свойствам, приходится решать численно. Таким образом, эффективность решения задач в значительной мере определяется вычислительными ресурсами, которыми располагают исследователи. Кроме того, моделирующие системы содержат большое количество основных уравнений и вспомогательных соотношений, поскольку исследуемые молекулы имеют сложное атомное строение. В то же время, представление исследуемых молекул в

виде упругих поверхностей или одномерных упругих объектов (упругих стержней) позволяет с одной стороны уйти от перечисленных трудностей, а с другой – получить исчерпывающие представления как о процессах во внутренней структуре молекул, так и об их пространственной конфигурации и их взаимосвязи.

В то же время, подход, предложенный Д. Хёрстом и Р. Бенхемом для описания поведения молекул, обладает рядом принципиальных недостатков, связанных с тем, что модель Кирхгофа-Клебша, описывающая деформации упругого стержня, основана на представлениях о симметричности тензоров напряжений и деформаций, возникающих в упругом теле под действием внешних воздействий. Такая гипотеза не отражает процессы, происходящие в естественных молекулярных системах, является слишком упрощенной, поскольку модель Кирхгофа-Клебша основывается на классической теории упругости.

По этой причине Д. Хёрст и Р. Бенхем в своих работах не продвинулись дальше формальных постановок задач описания поведения молекулы ДНК в целом уравнениями Кирхгофа-Клебша.

Авторам данной работы удалось устранить указанные недостатки, используя модели сплошных сред, каждая из которых позволяет учесть определенный вид внутренних взаимодействий или начального состояния молекулы как объекта управления и соответствующим образом скорректировать систему уравнений модели [16, 18, 19].

В то же время, в [17] в нелинейной постановке был разработан общий метод определения устойчивых пространственных форм равновесия деформируемых стержней. В работах [16, 18] осуществлена редукция от трехмерной задачи теории упругости к системе двумерной и одномерной задач, и одномерная задача взята в качестве модели, описывающей процесс деформации объекта. Это позволяет рассмотреть задачу управления пространственными формами равновесия как задачу управления системой с сосредоточенными параметрами.

Особенностью метода анализа форм равновесия, разработанного в [17], является возможность установить все допустимые формы устойчивого равновесия объекта, соответствующие определенному классу воздействий. Воздействия, в свою очередь, можно характеризовать соответствующим решением системы уравнений объекта (в нашем случае системы уравнений Кирхгофа-Клебша, скорректированной в соответствии с выбором модели сплошной среды). Отдельное преимущество рассматриваемого подхода состоит в том, что нет необходимости интегрировать уравнения объекта, поскольку, как показано в [16, 18, 19], известные решения с соответствующими уточнениями могут обобщаться для скорректированных уравнений.

Сказанное в первую очередь относится к точным решениям системы уравнений деформации. Однако именно точные решения являются ключевым инструментом классификации естественных форм равновесия исследуемых объектов, или, говоря языком техники, допустимых режимов функционирования системы.

Для целей определения конфигурации точные решения обладают большим преимуществом, поскольку они содержат много параметров – т.е. потенциально много типов возможных взаимодействий внутри молекул, которые определяют упругие свойства молекул и их конформации в зависимости от разного класса действующих сил.

Параметры, входящие в конкретное точное решение, являются безразмерными, поэтому определяют классы допустимых форм равновесия лишь на качественном уровне. По сути, множество допустимых для существования данного решения значений параметров задает в пространстве состояний системы гиперповерхность, каждая точка которой соответствует устойчивой форме равновесия.

Для оценки характеристик направленных воздействий, переводящих молекулу в желаемую форму равновесия, необходим переход к размерным значениям параметров, позволяющих соотносить характеристики внешних воздействий с изменениями внутренних состояний молекулярной системы.

В рамках рассматриваемой идеи направленного воздействия на структуру электромагнитных полей внутри молекулы переход к размерным параметрам означает, например, что в качестве критериев оптимизации управляющих воздействий можно выбрать напряженности электрического и магнитного полей или потенциал электрического поля.

Переход к размерным параметрам математической модели также необходим при решении задач, связанных с идентификацией физических параметров молекулы. Выявление связи конформация – параметры позволит более полно ответить на вопросы о связи между формой ДНК и ее функциями в молекулярном комплексе клеточного ядра. Анализ связи параметры –конформация позволяет решить задачу управления конформацией через воздействия на внутренние параметры молекулы внешними факторами, например, электромагнитными полями.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И УРАВНЕНИЕ МОДЕЛИ

Базовую систему уравнений деформации эквивалентного молекуле упругого стержня, следя работе [17], запишем в виде

$$\frac{d}{ds} (\mathbf{M} + \boldsymbol{\lambda}) = (\mathbf{M} + \boldsymbol{\lambda}) \times \boldsymbol{\omega} + \mathbf{P}(e \times \boldsymbol{\gamma}), \quad \frac{d}{ds} \boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\gamma} \times \boldsymbol{\omega}, \quad (1)$$

где  $\boldsymbol{\omega}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  – вектор Дарбу оси стержня,  $\mathbf{P}$  – равнодействующая концевых сил,  $\mathbf{M}(M_1, M_2, M_3)$  – вектор-момент внутренних сил,  $\boldsymbol{\gamma}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$  – единичный вектор вдоль концевой силы,  $e(1, 2, 3)$  – единичный вектор касательной к оси стержня, вектор  $\boldsymbol{\lambda}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$  характеризует форму оси стержня к первоначальному состоянию. Дифференцирование по дуговой координате  $s$  производится в главных осях изгиба и кручения.

Система дифференциальных уравнений (1) содержит девять неизвестных величин:  $M_i, \gamma_i, \omega_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) поэтому является незамкнутой. Для того чтобы получить

Указание реквизитов гранта, в рамках которого подготовлен доклад. Если доклад не связан с грантами, то удалите данный текстовый блок.  
Используется стиль «Реквизиты гранта»

недостающие три уравнения, привлекают к рассмотрению уравнения теории упругости. В классической теории стержней Кирхгофа эти замыкающие уравнения имеют вид

$$M_i + \lambda_i = \sum_{j=1}^3 B_{ij}(\omega_j - \omega_j^0), \quad (2)$$

где  $\omega_i^0$  – компоненты в главных осях изгиба и кручения вектора Дарбу  $\boldsymbol{\omega}^0$  для недеформированного состояния,  $B_{ij}$  – компоненты матрицы жесткостей стержня. В дальнейшем рассматриваются изотропные стержни ( $M_i = 0, i \neq j$ ).

Система уравнений (1) совместно с замыкающими соотношениями (2) допускает два общих интеграла:

$$\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 = 1, \quad (3)$$

$$M_1\gamma_1 + M_2\gamma_2 + M_3\gamma_3 = K, \quad (4)$$

третий интеграл (интеграл энергии), в случае равенства нулю недиагональных компонентов матрицы жесткостей, имеет вид:

$$B_{11}\omega_1^2 + B_{22}\omega_2^2 + B_{33}\omega_3^2 - 2P\gamma_1 = 2H. \quad (5)$$

Во многих случаях процедура интегрирования системы (1) сводится к поиску четвертого интеграла, которого в соответствие с теорией последнего множителя Якоби достаточно для получения основных переменных в виде функции дуговой координаты [17, 20].

Схематическое представление молекулы ДНК в качестве упругого стержня показано на рис. 1.

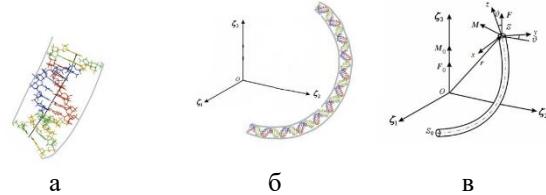


Рис. 1. механическая модель молекулы ДНК

На данном рисунке представлены участок молекулы ДНК, содержащий две пары нуклеотидных оснований (а), целая молекула, содержащая порядка 120 000 пар нуклеотидных оснований (б) и эквивалентный упругий стержень (в).

Суть механической модели молекулы ДНК (рис. 1) состоит в том, что молекуле ставиться в соответствие упругий стержень, ось которого совпадает с гипотетической осью молекулы, а боковая поверхность – с гипотетической боковой поверхностью молекулы, а также обладающий близкими к молекуле механическими характеристиками. Поведение такого стержня под действием внешних сил будет эквивалентно поведению молекулы ДНК, взаимодействующей с внешней средой.

Дополнительно отметим, что такое представление возможно благодаря уникальным по молекулярным меркам масштабам молекулы ДНК: от нескольких тысяч нанометров, до нескольких сантиметров.

Система (1) с уравнениями связи в форме (2) описывает деформации изотропного стержня постоянного поперечного сечения. С помощью такой модели удобно анализировать общую геометрию молекулы, не касаясь вопросов внутренних взаимодействий. Как показали

исследования, для задач качественного анализа геометрии во многих случаях этого оказывается достаточно [13–15].

Для задач идентификации параметров модель вида (1)–(2) может оказываться грубой, поскольку не учитывает внутренние взаимодействия. В этом случае в зависимости от выбора гипотез о свойствах сплошной среды, соотношения (2) корректируются либо получаются с помощью редукции трехмерной задачи теории упругости [14–19].

Особое значение уточнение модели приобретает в связи с наличием внутримолекулярных параметров, которые могут приводить к появлению большого числа дополнительных степеней свободы. Речь идет о таких величинах, как валентные и торсионные углы [10, 16]. (рис. 2).

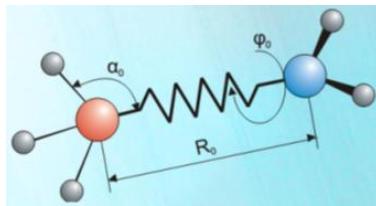


Рис. 2

Необходимость учета этих специфических параметров ведет к рассмотрению сплошной среды с вращательными и нецентральными взаимодействиями частиц [16–18].

Для системы (1) с уравнениями связи (2), либо их модификацией, ставятся две задачи: задача выявления связи «параметры – конформация» и задача выявления связи «конформация – параметры» (задача идентификации).

Решение первой задачи можно проиллюстрировать на примере точных решений системы (1) для различной формы соотношений (2).

Решение второй задачи может опираться на методы теории наблюдения динамических систем [20–22].

### III. ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ

Приведем примеры реализации общего подхода к задаче управления конформациями, развитого в [16–18].

**Пример 1.** Пусть параметры системы (1) – (2) удовлетворяют условиям:

$\lambda_1 = 1$ ,  $\lambda_2 = 0$ ,  $\lambda_3 = 0$ ,  $\lambda_{22} = \lambda_{33}$ ,  $\lambda_{ij} = 0$  ( $i \neq j$ ),  $\lambda_3 = 0$ ,  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – константы, что указывает на то, что ось молекулы в естественном состоянии – винтовая линия, что соответствует наиболее часто наблюдалась форме молекулы в естественном состоянии. Рассматриваемый случай соответствует анизотропии физических свойств молекулы с наличием плоскости упругой симметрии.

Введём безразмерные величины

$$\lambda_1 = \lambda_2 x, \quad \lambda_2 = \lambda_2 y, \quad \lambda_3 = \lambda_2 z, \quad g = \lambda_{22}/\lambda_{11}, \quad (6)$$

$$p = \lambda_{22} P / \lambda_2^2, \quad k = K / \lambda_2^2, \quad 2 = 2B_{22} H / \lambda_2^2, \quad \lambda_1 = r \lambda_2.$$

Пусть для констант в интегралах (3)–(5) выполняются следующие ограничения:

$$2 = \frac{1}{(1-a^2)^4} \left[ (-2a(a+1))^2 + a^2(1-a)^2 n^4 + (2a(1-a) + a^3(a+1)(a^2-3a+4))n^2 \right]$$

$$k = \frac{a(a-2)n(-a(a-1)n^2-(a+1)(a^2+1))}{(1-a^2)^3},$$

$$2 = \frac{2(a^2+a-1) + a^2(1-a)(a+3)n^2 + 4a(a+1)}{(1-a^2)^2},$$

$$\text{где } a = \frac{1 \mp \sqrt{g^2 - g + 1}}{1-g}, \quad n = r \frac{1-a^2}{a^2 - a + 1}.$$

Тогда система дифференциальных уравнений (1) допускает решение, в котором основные безразмерные переменные связаны равенствами [17]:

$$y = \frac{ax^2 - anx + 2a(a+1)}{1-a^2}, \quad (7)$$

$$z^2 = \frac{-a^2x^4 + 2a^2nx^3 + (-a^2n^2 - 2a\alpha)x^2 + 2an(\alpha + a(a+1))x - \alpha}{(1-a^2)^2},$$

$$pv_1 = \frac{-a(a+1)x^2 + 2an(a+1)x - \alpha}{(1-a^2)^2}, \quad pv_2 = \frac{(x-n)z}{(1-a^2)}.$$

Область изменения параметра  $a$  найдена в работе [17] и представляет собой следующие промежутки:

$$a < -1, \quad 0 < a < 1, \quad a > 2.$$

### Результаты моделирования

На рис. 3 представлены результаты моделирования конформаций ДНК, соответствующих различным комбинациям параметров решения (7). Для моделирования применялись безразмерные значения параметров, которые, будучи комбинацией размерных, фактически задают целевые многообразия, на которых объект управления (молекула) сохраняет желаемую конфигурацию.

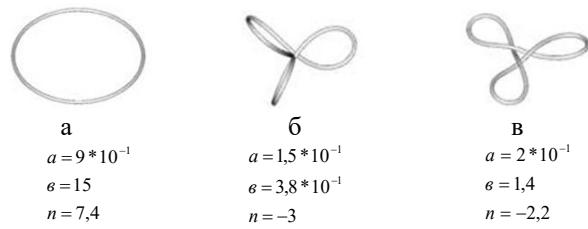


Рис. 3

### Пример 2. Моделирование конформаций с учетом взаимодействия между кручением

В работе [19] предложено обобщение модели (1)–(2) для случая, когда стержень обладает естественным кручением в начальном состоянии. Для ДНК это соответствует состоянию сверхспирализации. Для обобщенной модели сохраняется идеология получения безразмерных параметров в виде комбинации силовых и энергетических характеристик, а также констант инвариантов системы (1):

$$(H - B_1 \omega_1^2)/2P = , \quad C_1/\sqrt{2PB_2} = b, \quad K/\sqrt{2PB_2} = \beta,$$

$$B_1 \omega_1/\sqrt{2PB_2} = \omega, \quad \sqrt{B_2/2P} = n, \quad (8)$$

$$(I_P - T)/\Omega = I, \quad B_2/B_1 = b_1, \quad B_1 r \omega_1/P = b_2,$$

$$r \omega_1 (I_P - T)/\Omega = b_3.$$

Для случая равных жесткостей на изгиб в [19] получено точное решение системы (1), обобщающее классическое решение Лагранжа [17]. Для краткости решение приводить не будем, остановимся на результатах моделирования конформаций молекулы в областях допустимых значений параметров этого решения (8).

Рис. 4 иллюстрирует наличие замкнутых пространственных конфигураций, обладающих значительной степенью закрученности. Применительно к молекулам ДНК этот эффект демонстрирует явление сверхспирализации, присущее третичной структуре молекулы. Для сравнения на рис. 4, а приведена конфигурация, соответствующая одноковому набору значений общих параметров и отсутствию естественной закрученности.

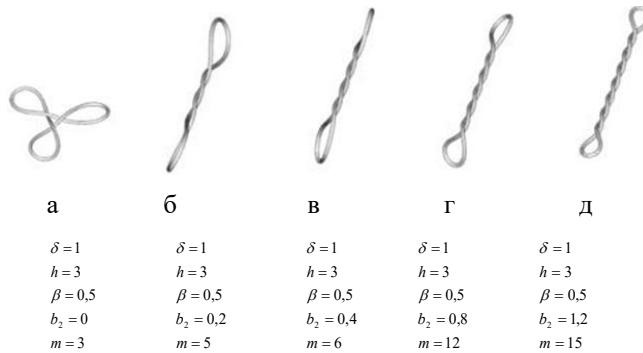


Рис. 4

### Пример 3. Моделирование конформаций с учетом нецентрального взаимодействия

В этом примере рассмотрим результаты моделирования, полученные в наиболее приближенных к молекулярному объекту условиях: уравнения связи в модели деформации получены редукцией трехмерной задачи теории упругости для сплошной среды с нецентральными вращательными взаимодействиями [12, 16, 18]. В частности, в работе [16] показано, что в уравнениях связи (2) появляются дополнительные слагаемые, вызванные наличием моментных напряжений в структуре вещества, и они приобретают вид

$$\begin{aligned} M_1 &= \omega_1 + \omega_1, \\ M_2 &= \omega_2 + \omega_3, \\ M_3 &= \omega_3 + \omega_2. \end{aligned} \quad (9)$$

В [16] найдено точное решение системы (1) с уравнениями связи (9), содержащее безразмерные параметры в виде следующих комбинаций:

$$\begin{aligned} \sqrt{B_2/2P} &= n, (2H - )/2P = , a = \frac{1}{1}, a_2 = \frac{1}{2}, \\ K/\sqrt{2PB_2} &= \beta. \end{aligned} \quad (10)$$

На рис. 5 приведены примеры пространственных конформаций молекул, получаемых при фиксированных значениях параметров (10).

Для иллюстрации совпадения моделируемых конформаций с конформациями реальных молекул ДНК на рис. 6 приведены микроскопные снимки наблюдения ДНК в естественной среде.

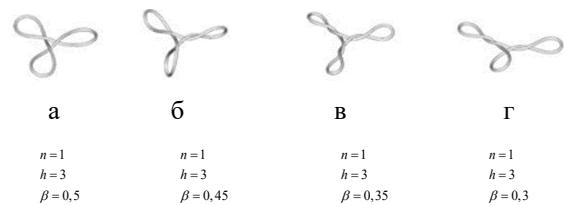


Рис. 5

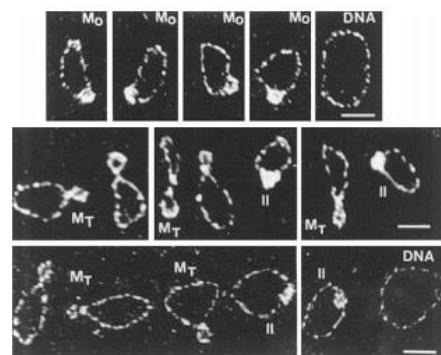


Рис. 6

Из рис. 6 видно, что во всех приведенных примерах моделирования можно наблюдать совпадение конформаций, наблюдаемых в естественной среде с полученными расчетным способом на основании данного подхода. Это указывает на возможность с помощью управления параметрами молекулы привести их в желаемую конформацию. А, следовательно, в рамках рассматриваемой гипотезы о влиянии формы на свойства – и получить заданные свойства. С учетом сказанного во введении к работе, можно сделать вывод, что при переходе размерным параметрам системы можно установить характер управляемых воздействий, переводящих ее в желаемое состояние. Другими словами, задача управления пространственными конформациями молекул принципиально разрешима.

### Задача идентификации

В качестве основного подхода к решению задачи идентификации параметров молекулы предлагается использовать методы теории наблюдения динамических систем. Это связано с тем, что в большинстве случаев измерения необходимых величин либо невозможно осуществить имеющимися средствами, либо эти измерения сопряжены с большими трудностями. Последнее непосредственно касается выбранных объектов исследования, поскольку приборов, непосредственно измеряющих внутримолекулярные параметры, на сегодняшний день не существует.

Кроме того, постановка краевой задачи или задачи Коши для дифференциальных уравнений изгиба и крученя упругих стержней не всегда возможна из-за отсутствия необходимых начальных или граничных условий. В то же время могут быть известны значения какой-либо величины в нескольких точках молекулы. В этом случае возникает вопрос: нельзя ли измеряя другие величины, вычислять значения нужных параметров? Ответ на него и призваны дать методы теории наблюдения [20–22].

Приведем необходимую формализацию и постановку основных видов задач идентификации

Положение главных осей изгиба и кручения молекулы по отношению к осям  $\xi\eta\zeta$ , фиксированным в пространстве, можно определить, например, с помощью углов Эйлера  $\varphi, \psi, \theta$ .

Кинематические формулы

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \dot{\psi} \cos \vartheta + \dot{\phi}, \\ \omega_2 &= \dot{\psi} \sin \vartheta \sin \phi + \dot{\vartheta} \cos \phi, \\ \omega_3 &= \dot{\psi} \sin \vartheta \cos \phi - \dot{\vartheta} \sin \phi,\end{aligned}\quad (11)$$

в которых точкой обозначена производная по дуговой координате и геометрические соотношения

$$\gamma_1 = \sin \vartheta \sin \phi, \gamma_2 = \sin \vartheta \cos \phi, \gamma_3 = \cos \vartheta \quad (12)$$

устанавливают связь переменных  $\gamma_i, \omega_i$  с углами Эйлера. Уравнения упругой линии (геометрической оси) молекулы с использованием углов Эйлера имеют вид

$$\dot{\xi} = \sin \psi \sin \vartheta, \dot{\eta} = \cos \psi \sin \vartheta, \dot{\zeta} = \cos \vartheta, \quad (13)$$

где  $\xi, \eta, \zeta$  – декартовы координаты точек оси молекулы.

Следя [20], запишем уравнения системы (1) в компонентной форме, разрешив их относительно производных  $\dot{\omega}_i$ :

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_1 &= b_1 \omega_2 \omega_3 + c_1 \gamma_2, \\ \dot{\omega}_2 &= b_2 \omega_1 \omega_3 - c_2 \gamma_1, \\ \dot{\omega}_3 &= b_3 \omega_1 \omega_2;\end{aligned}\quad (14)$$

$$\begin{aligned}\dot{\gamma}_1 &= \gamma_2 \omega_3 - \gamma_3 \omega_2, \\ \dot{\gamma}_2 &= \gamma_3 \omega_1 - \gamma_1 \omega_3, \\ \dot{\gamma}_3 &= \gamma_1 \omega_2 - \gamma_2 \omega_1.\end{aligned}\quad (15)$$

Уравнения (11), (13), (14), в которых учтены соотношения (12), составляют полную систему уравнений, в результате интегрирования которой определяются основные параметры молекулы. Кроме того, уравнения (14), (15) являются замкнутыми и могут служить объектом самостоятельного исследования. Для полной системы уравнений или для замкнутой ее части поставим следующую задачу.

одной или n скольких точках из с тны знач ния и к ото ых функций осно ных п м нны. озможно ли по этим знач ниям вычислить знач ния с х осно ных п м нны x одной из точ куп угор линии?

Применяя результаты теории наблюдения нелинейных динамических систем [20, 21], можно утверждать, что данная задача имеет решение, если изучаемая система дифференциальных уравнений является наблюдаемой по функциям, значения которых известны по условию задачи.

Рассмотрим параметров молекулы, идентификацию которых можно проводить по ее пространственной конформации.

### Измерение координат

Специфической особенностью рассматриваемых задач является то, что в большинстве случаев известны значения координат  $\xi, \eta, \zeta$  на одном из концов молекулы, например при  $s = 0$  имеем  $\xi(0) = 0, \eta(0) = 0, \zeta(0) = 0$ . в этих случаях наблюдаемость системы (11), (14) по

некоторой функции  $\rho$  от переменных  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \varphi, \psi, \vartheta$  означает и наблюдаемость полной системы (11), (12), (14) по этой функции. Если же измеряемая функция  $\rho$  зависит и от переменных  $\xi, \eta, \zeta$ , то при исследовании наблюдаемости полной системы (11), (12), (14) производные от измеряемой функции вычисляются в силу полной системы, но якобиева матрица строится только по переменным  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \varphi, \psi, \vartheta$  [20, 21].

Первой рассмотрим задачу наблюдения, состоящую в измерении декартовых координат некоторых точек упругой линии молекулы. Измерение декартовых координат достаточно просто реализовать на практике, и, кроме того, именно для этих переменных записываются дифференциальные уравнения в задачах деформации стержневых систем.

**Задача 1.** Рассматривается система (11), (13), (14). Значения координат в любой точке упругой линии считаются неизвестными. Измеряемой функцией является  $\rho(\xi, \eta, \zeta)$ . Требуется найти значения девяти величин  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \varphi, \psi, \vartheta, \xi, \eta, \zeta$ . Данная задача имеет решение, если изучаемая система является наблюдаемой [20, 21].

**Задача 2.** Рассматривается система (11), (13), (14). Известны значения декартовых координат на одном из концов упругой линии. Измеряемой является функция  $\rho(\xi, \eta)$ . Требуется вычислить значения девяти переменных  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \varphi, \psi, \vartheta, \xi, \eta, \zeta$  в некоторой точке упругой линии.

Как показано в [20, 21], для нахождения всех параметров упругой линии достаточно знать ее проекцию на горизонтальную плоскость в пяти точках.

### Измерение угла поворота главных осей изгиба и кручения

**Задача 3.** Рассматривается система (14), (15). Измеряемой функцией служит  $\rho = \frac{\omega_1}{\omega_2}$  – тангенс угла поворота вокруг касательной главных осей изгиба и кручения молекулы относительно естественного трехгранника. Требуется вычислить значения переменных  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ .

Согласно [20, 21], что при соответствующем выборе достаточно знать значения угла поворота осей изгиба и кручения в пяти точках, чтобы по ним вычислить значения переменных  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  во всех точках упругой линии. Следует отметить, что экспериментально измерение угла поворота поперечного сечения является одной из простейших задач.

**Задача 4.** Рассматривается система (14), (15). Измеряемой функцией является квадрат кривизны  $\rho = \omega_1^2 + \omega_2^2$ . Требуется вычислить значения переменных  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ .

По аналогии с предыдущей задачей, для вычисления переменных  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  достаточно знать значения кривизны упругой линии в пяти соответствующих точках [20, 21].

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Фанк-Кампцикий Д., до . . . , Дыхн . . . Переход спираль – клубок в ДНК // УФН. – 1971. – Т. 105. – Вып. 3. – С. 479-519.
2. Benham C.J. Elastic model of supercoiling // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 1977. – 74. – Р. 2397-2401.
3. Hearst J.S. Torsional rigidity of DNA and length dependence of the free energy of DNA supercoiling // J. Mol. Biol. – 1984. – 173. – Р. 75-91.
4. Hunter C.A. Sequence-dependent DNA Structure: The Role of Base Stacking Interactions // J. Mol. Biol. – 1993. – 230. – Р. 1025-1054.
5. Frank-Kamenetskii M.D., Lukashin A.V., Anshelevich V.V. & Vologodskii A.V. Torsional and bending rigidity of the double helix from data on small DNA rings // J. Biomol. Struct. Dynam. – 1985. – 2. – Р. 1005-1012.
6. Swigon D. Configurations with self-contact in the theory of the elastic rod model for DNA. Rutgers University, New Brunswick, 1999. – 255 p.
7. Bouchiat C. and Mezard M. Elasticity model of supercoiled DNA molecule // Phys. Rev. Lett. – 1998. – 80. – Р. 1556-1559.
8. Козло Н.Н., Кугуш Е.И., абитуриентин Е.Л. Компьютерный анализ процессов структурообразования нуклеиновых кислот // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. – 2002. – № 19, № 42.
9. Hunter C.A. Sequence-dependent DNA Structure: The Role of Base Stacking Interactions // J. Mol. Biol. – 1993. – 230. – Р. 1025-1054.
10. Olson W.K., Gorin A.A., Lu X.-J., Hock L.M. & Zhurkin V.B. DNA sequence-dependent deformability deduced from protein-DNA crystal complexes // Proc. Natl Acad. Sci. USA. – 1998. – 95. – Р. 11163-11168.
11. Strick T.R., Croquette V., and Bensimon D. Homologous Pairing in Stretched Supercoiled DNA // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 1998. – 95 (18). – Р. 10579-10583.
12. Илюхин . . . , Щипин Н.Н. К моментной теории упругих стержней // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Специ выпуск. – 2001. – С. 92-94.
13. Илюхин . . . , Тимошико Д. . Математический анализ условий замкнутости молекул ДНК // Материалы Международной XI научно-технической конференции «Математические модели физических процессов». – Таганрог, 2005. – С. 135-143.
14. Илюхин . . . , Тимошико Д. . Новый метод определения условий замкнутости молекул ДНК // Обзорение прикладной и промышленной математики. – М., 2006. – Т. 13. – Вып. 2. – С. 322-324.
15. Илюхин . . . , Тимошико Д. . Математическая модель замкнутых молекул ДНК // Известия Саратовского университета. Сер. Математика. Механика. Информатика. – 2008. – Т. 8. – Вып. 3. – С. 32-40.
16. Илюхин . . . , Тимошико Д. . Микрополярная теория упругих стержней // Известия Саратовского университета. Сер. Математика. Механика. Информатика. – 2008. – Т. 8. – Вып. 4. – С. 27-39.
17. Илюхин . . . Пространственные задачи нелинейной теории упругих стержней. – Киев: Наукова думка, 1979. – 216 с.
18. Илюхин . . . , Тимошико Д. . К одномерной микрополярной теории упругих стержней // Труды IV Всероссийской школы-семинара «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете». – Ростов-на-Дону. – 2008. – С. 49-57.
19. Илюхин . . . , Тимошико Д. . Точное решение системы уравнений Кирхгофа для естественно закрученного стержня с равными жесткостями на изгиб // Труды XI Международной конференции «Современные проблемы механики сплошной среды». – Ростов-на-Дону. – 2007. – С. 144-147.
20. Го Г. . . , Илюхин . . . , Ко ал . . . , а ч ико Я. Нелинейный анализ поведения механических систем. – Киев: Наукова думка, 1984. – 288 с.
21. Ко ал . . . Нелинейные задачи управления и наблюдения в теории динамических систем. – Киев: Наукова думка, 1980. – 176 с.
22. Ко ал . . . , Илюхин . . . к определению параметров оси стержня, деформированного концевыми нагрузками // Механика твердого тела. – 1980. – Вып. 12. – С. 100-108.

# Методика применения обобщенных критериев устойчивости для класса пространственно-инвариантных систем

Мясникова Елена Васильевна  
Пятигорский институт (филиал)  
СКФУ  
Северо-Кавказский федеральный  
университет  
Пятигорск, Россия  
*alena.pink.hummer@gmail.com*

Чернышев Александр Борисович  
Пятигорский институт (филиал)  
СКФУ  
Северо-Кавказский федеральный  
университет  
Пятигорск, Россия  
*chalbor@rambler.ru*

Цаплева Валентина Викторовна  
Пятигорский институт (филиал)  
СКФУ  
Северо-Кавказский федеральный  
университет  
Пятигорск, Россия  
*vtsapleva@ncfu.ru*

**Аннотация.** В работе рассмотрен класс пространственно-инвариантных нелинейных систем с распределенными параметрами. Известны обобщенные критерии анализа устойчивости таких систем. Однако, они применимы только для систем, структурная схема которых представима в виде последовательного соединения нелинейного элемента и линейной части системы. В данной работе с использованием пространственного фильтра, разработана методика применения обобщенных критериев на нелинейные системы, в которых не представляется возможным выделение нелинейности в виде отдельного звена.

**Abstract.** The paper considers the class of spatially invariant nonlinear systems with distributed parameters. Generalized criteria for analyzing the stability of such systems are known. However, they are applicable only for systems whose structural diagram is represented as a series connection of a nonlinear element and a linear part of the system. In this paper, using a spatial filter, a method for applying generalized criteria to nonlinear systems in which it is not possible to isolate nonlinearity in the form of a separate link has been developed.

**Ключевые слова:** распределенные системы, нелинейный элемент, устойчивость, пространственный фильтр.

**Key words:** distributed systems, nonlinear element, stability, spatial filter.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данной темы обусловлена тем, что быстрые темпы развития технологий и потребностей их практического применения в последние десятилетия вызвали необходимость рассмотрения многих реальных объектов управления в качестве объектов с распределенными параметрами. Поведение управляемых величин меняется не только от времени, но и от того, как они расположены в определенной пространственной области, которую занимает объект. К объектам и системам с распределенными параметрами относятся: электромагнитные поля, аэродинамика, гидродинамика, теплопроводность, диффузия, упругость и пластичность, квантовая физика. Управляемые величины распределенных систем можно выразить функциями нескольких переменных. Кроме времени, к аргументам таких функций

можно отнести пространственные координаты. Математическая модель, которая описывает функционирование распределенной системы, и изменение управляемых величин может быть описана дифференциальными уравнениями в частных производных, интегральными, интегро-дифференциальными уравнениями. Это лишь небольшая часть, поскольку математическую модель могут описывать системы уравнений самой различной природы.

На сегодняшний день область теории систем с распределёнными параметрами имеет большое количество результатов. В большей степени эти результаты сосредоточены на исследовании линейных систем [1]. Как показывает практика, большая часть объектов, для которых разрабатывается построение автоматической системы управления, не являются линейными. В некоторых случаях наличием нелинейности можно пренебречь, ориентируясь на цели управления. Некоторые случаи предполагают преобразование нелинейных систем, в линейные системы. В такой ситуации модель системы будет приближена, однако не сможет быть полностью отождествлена с реальной системой, что в некоторых случаях может быть вполне приемлемо с практической точки зрения. Анализ систем управления, в частности анализ их устойчивости – одна из самых важных задач исследования систем [2]. С технической точки зрения, устойчивость систем управления является свойством, при котором система работает стабильно в нормальном режиме функционирования. Для синтезирования системы управления нелинейными объектами, нелинейный элемент необходимо сформировать в структурной схеме в виде нелинейного блока, который будет последовательно соединен с нелинейной частью объекта.

## II. КЛАСС ПРОСТРАНСТВЕННО-ИНВАРИАНТНЫХ СИСТЕМ

Известно, что любые разрабатываемые методики и подходы применимы к некоторому ограниченному классу, относящемуся к более общему научному направлению. В нашем случае важнейшим ограничением общего класса распределенных систем является их пространственная инвариантность. В числе прочего пространственная инвариантность систем предполагает возможность представления входного воздействия на систему в виде

разложения в ряд. Чаще всего используется разложение в ряд Фурье по собственным функциям. При этом предполагается, что каждая гармоника ряда (мода) не влияет на соседнюю и другие гармоники или же это влияние не является значительным, другими словами матрица передаточных функций должна обладать свойством диагональной доминантности. В результате такого представления появляется возможность представления общей задачи в виде отдельных подзадач. Каждая пространственная мода воспринимается в виде отдельной задачи [3, 4]. Общая задача синтеза и исследования устойчивости сводится к исследованию каждой моды отдельно. Главным недостатком такого подхода является тот факт, что ряды Фурье являются бесконечными. При этом неизбежной является необходимость отсечения значительного количества мод. Однако, как показала практика для реализации таких систем чаще всего достаточным является учет только нескольких первых гармоник. Существует также вопрос о сходимости ряда.

Особого внимания заслуживает частотный метод синтеза регуляторов. Основные подходы частотного метода, в настоящее время приспособлены для распределенных систем, с учетом модального представления, то есть в виде совокупности отдельных пространственных мод [5].

Для определения статических характеристик пространственно-усилительного звена, входное воздействие представим в виде ряда Фурье по пространственным координатам.

$$a(x, y, s) = \sum_{\eta, \gamma=1}^{\infty} \sum_{\xi=1}^4 C_{\eta, \gamma, \xi}(s) B_{\eta, \gamma, \xi}(x, y)$$

Коэффициент усиления пространственно-усилительного звена по каждой составляющей ряда входного воздействия можно представить в следующем виде:

$$K_{\eta, \gamma, \xi} = E_1 \left[ \frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} (\psi_{\eta}^2 + \tilde{\psi}_{\gamma}^2) \right], \quad (\eta, \gamma = \overline{1, \infty}; \xi = \overline{1, 4})$$

Передаточную функцию пространственно-усилительного звена можно представить в виде:

$$K(G) = E_1 \left[ \frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G \right], \quad 0 \leq G \leq \infty$$

В случае систем с распределенными параметрами, сигналы в общем случае описываются функциями нескольких аргументов. На сигнал, поступающий на вход нелинейного звена, может влиять не только время, но и пространственные координаты.

Это означает, что учитывается не только время действия и изменение сигнала в процессе функционирования системы, но и различная величина и форма сигнала для различных пространственных точек объекта.

Для дальнейшего исследования необходимо учитывать следующие условия:

- представление нелинейного распределенного объекта структурно в виде последовательно соединенных нелинейного и линейного звеньев;

- используя реакцию объекта по двум пространственным модам (статической и динамической) определяем параметра аппроксимационного (линейного) звена, описывающего рассматриваемый объект.

Передаточная функция такого звена записывается в виде:

$$W_n(s) = \frac{\exp(\beta_n \cdot \bar{y}) + \exp(-\beta_n \cdot \bar{y})}{\exp(\beta_n \cdot l_y) + \exp(-\beta_n \cdot l_y)}$$

### III. Обобщенные критерии устойчивости

Устойчивое положение равновесия рассматриваемой системы зависит от многих факторов [6]. От геометрических размеров объекта ( $X, Y, Z$ ), от расположения плоскости сечения, от материала объекта (коэффициента температуропроводности). Будем считать эти параметра фиксированными для конкретного объекта. Рассмотрим устойчивость системы в зависимости от номера пространственного контура (моды)  $n$ , от весового коэффициента нелинейного распределенного звена  $n_1$ , от общего коэффициента усиления  $E$ . Возьмем в качестве начального, «эталонного» варианта состояния системы:  $n=1, n_1=1, E=1$  (рис. 1).

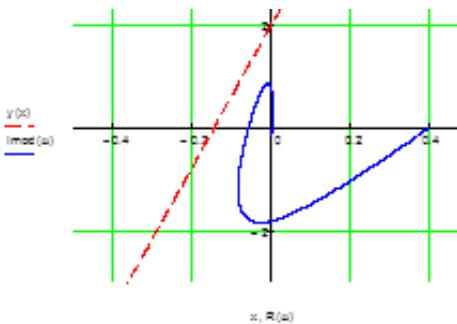


Рис. 1. Взаимное расположение годографа и прямой

Прямая проходит через точку  $X_1 = -0,146$  действительной оси и не пересекает годограф, следовательно, при указанных значениях параметров, система устойчива.

Передаточную функцию линейной части системы для каждой пространственной моды можно отобразить следующим образом:

$$W_n(s) = \frac{\exp(\beta_n \cdot \bar{z}) + \exp(-\beta_n \cdot \bar{z})}{\exp(\beta_n \cdot Z) + \exp(-\beta_n \cdot Z)},$$

$$\beta_n = \left( \frac{s}{a} + \varphi_n^2 + \psi_n^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$\varphi_n = \frac{\pi n}{X}, \quad \psi_n = \frac{\pi n}{Y}, \quad n = \overline{1, \infty}$$

Для построения годографа линейной части обобщенного кругового критерия используется обычная частотная характеристики, т.е. в отличие от критерия Попова не является модифицированной. Ее мнимая часть не умножается на частоту. Нелинейная характеристика расположена в секторе, ограниченном прямыми с угловыми коэффициентами:

$$k_n = E_k \left[ \frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G_n \right], r_n = E_r \left[ \frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G_n \right]$$

Взаимное расположение годографа и круга будет зависеть от номера пространственной моды  $n$ , от значения весового коэффициента  $n_1$ , от величины и соотношения общих коэффициентов усиления  $E_k$  и  $E_r$ , при условии:  $E_k > E_r$ . Примем, в качестве «эталонного» вариант при котором  $E_k = 2$ ,  $E_r = 1$ ,  $n_1 = 1$ ,  $n = 1$  (рис. 2). Центр круга в точке  $X_0 = -0,109$ , радиус  $R = 0,036$ . Годограф не охватывает точек круга, следовательно, первая мода устойчивая.

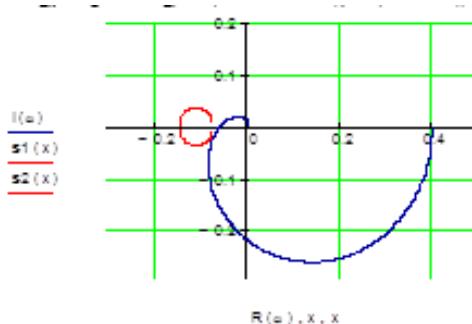


Рис. 2. Расположение годографа и круга

При увеличении номеров мод, центр круга приближается к началу координат, радиус уменьшается. Следует отметить, что модуль годографа уменьшается быстрее радиуса круга и относительное расстояние между ними увеличивается, в связи с чем можно полагать, что при больших номерах мод, система останется устойчивой.

#### IV. ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ СКАНЕР И ФИЛЬТР

Рассмотрим моделирование работы пространственного фильтра, настроенного на выбранные магистрали [7]. Для улучшения качества работы, пространственный фильтр по каждой магистрали может состоять из нескольких однотипных блоков (вектор входного воздействия  $U$  последовательно несколько раз умножается на одну и ту же обратную матрицу  $D_i^{-1}$ ). В рассматриваемом примере входное воздействие последовательно проходит через два блока, имеющих одинаковые параметры. Для удобства отображения функций выхода пространственных фильтров на графиках, в схему также включены нормировочные коэффициенты  $K_i$  ( $i = 1, 2$ ).

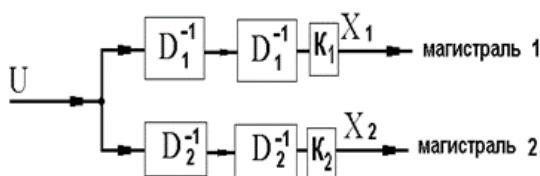


Рис. 3. Пространственный фильтр

При проведении процесса сканирования была получена информация с четырех датчиков. Данную информацию будем пропускать через пространственный сканер. В результате сканирования распределенной функции  $U_{sum}(x, t)$  были получены следующие графики значений определителя матрицы  $D$  ( $\Delta x, G$ ).

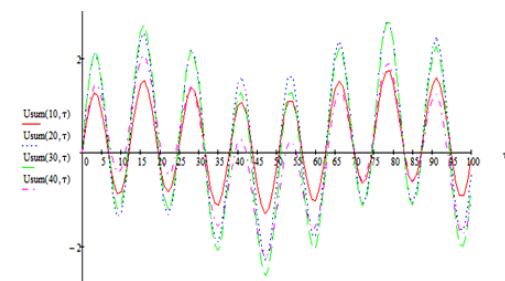


Рис. 4. Информация с датчиков

Для  $\Delta x$  лежащего в пределе от 10 до 100 с шагом 10 график значений определителя матрицы имеет вид. Исследуя графики значений определителя матрицы  $D$  ( $\Delta x, G$ ) для заданных параметров  $\Delta x$ , получим значения  $G$ , далее рассчитаем  $\psi$  и  $L_x$ .

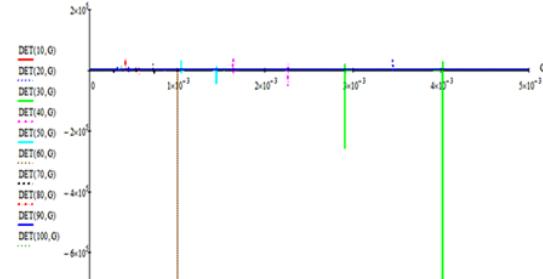


Рис. 5. График значений определителя матрицы

#### V. РАСШИРЕНИЕ КЛАССА НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОБОБЩЕННЫХ КРИТЕРИЕВ УСТОЙЧИВОСТИ

Известные обобщенные критерии анализа устойчивости нелинейных распределенных систем подразумевают, что структурная схема системы может быть представлена в виде последовательно соединенных нелинейного элемента и линейной части объекта [8, 9]. Но значительное количество нелинейных объектов содержат нелинейный элемент внутри самого объекта, тогда такое представление становится невозможным. Предполагается использование логарифмического представления частотных характеристик. Тогда нелинейную часть можно представить, как разность между характеристикой самого нелинейного объекта и характеристикой его линейной части.

Рассматриваемая методика распадается на следующие этапы:

1. Использование пространственного сканера для оценки статических и динамических характеристик распределенного объекта.



Рис. 6. Схема исследования

Если на вход подается такое входное воздействие, а распределенный объект нелинейный, то необходимо использовать пространственный сканер, определяющий частотные характеристики по выбранным пространственным модам. Эти частотные характеристики отражают линейные и нелинейные свойства объекта.

## 2. Описание линейной части объекта управления.

Задача состоит в разделении линейной и нелинейной частей рассматриваемого объекта управления. В литературе описана методика аппроксимации распределенных систем. Используя реакцию объекта по двум пространственным модам (статическим и динамическим) можно определить параметры аппроксимационного (линейного) звена, описывающий рассматриваемый объект.

## 3. Представление нелинейного распределенного объекта в виде нелинейного и линейного звеньев.

В результате экспериментального исследования полученные параметры линейного звена описывают заданный объект (соответственно и частотные поверхности), а также частотные характеристики нелинейного объекта. Используя логарифмические амплитудные характеристики нелинейного объекта и линейного аппроксимационного звена, определим частотные характеристики нелинейного элемента. Вычитая из логарифмической амплитудной и фазовой частотных характеристик объекта частотные характеристики линейного звена, получим амплитудную и фазовую частотные характеристики (поверхности) нелинейного элемента.

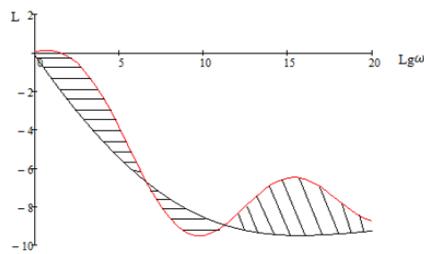


Рис. 7. Поверхность нелинейного элемента

Таким образом, удается решить задачу представления нелинейного распределенного объекта структурно в виде нелинейного и линейного звеньев.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было показано представление распределенных систем в виде совокупности независимых контуров. В выделенном классе распределенных систем имеется возможность разложения по собственным вектор-функциям оператора объекта. Исследованы имеющиеся критерии анализа абсолютной устойчивости класса нелинейных систем с распределенными параметрами. На базе проведенных исследований была произведена разработка методики, позволяющей использовать пространственный фильтр для анализа устойчивости нелинейных распределенных систем.

## ЛИТЕРАТУРА

- Першин И.М. Синтез систем с распределенными параметрами. – Пятигорск: изд-во РИА-КМВ, 2002. – 212 с.
- Чернышев А.Б., Антонов В.Ф., Ильюшин Ю.В. Моделирование релейно-импульсных распределенных систем. – Пятигорск, 2012.
- Martirosyan K.V., Chernyshev A.B., Martirosyan A.V., Tatyana K.V. Formation of the anterior heating function under the action of uniformly distributed sources // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EICOnRus 2020. – 2020. – P. 755-760.
- Martirosyan A.V., Chernyshev A.B., Martirosyan K.V. Calculation of the first switch-on time of distributed object's control action // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EICOnRus 2020. – 2020. – P. 750-754.
- Чернышев А.Б. Модифицированный годограф пространственно-aperiodического звена // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – № 2 (1). – С. 159-163.
- Чернышев А.Б. Обобщение методов анализа устойчивости для распределенных систем // Современная наука и инновации. – 2015. – № 3 (11). – С. 16-22.
- Чернышев А.Б., Мясникова Е.В., Назарцев М.С., Ткаченко И.В. Исследование распределенных систем на основе пространственно-частотного анализатора // Научная мысль. – 2016. – № 2. – С. 59-65.
- Чернышев А.Б., Антонов В.Ф., Майрансаев З.Р. Единый секторный критерий устойчивости распределенных систем // Системный синтез и прикладная синергетика. сборник научных работ X Всероссийской научной конференции. – Ростов-на-Дону, Таганрог, 2021. – С. 351-355.
- Чернышев А.Б., Кравцова А.Л., Соха Е.Ю. Анализ устойчивости процесса стабилизации температурного поля нелинейной распределенной системы // Автоматизация и современные технологии. – 2014. – № 9. – С. 16-21.

# Об одной функции управления в модели динамики биомассы фитопланктона

Ляпунова Ирина Артуровна

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*ialyapunova@sfedu.ru*

Таран Алексей Евгеньевич

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*ataran@sfedu.ru*

Фоменко Наталья Алексеевна

Российский государственный  
университет нефти и газа (НИУ)  
имени И.М. Губкина  
Москва, Россия  
*fomenko.nata.alex@gmail.com*

**Аннотация.** Существует множество моделей, описывающих управление динамикой биомассы фитопланктона относительно фотосинтеза и биогенного питания, и меньше всего внимания уделяется влиянию освещенности, что объясняется трудностями влияния на освещенность больших водных поверхностей. Рассмотрены особенности динамики распространения фитопланктона под влиянием освещенности и плотности доступных биогенных веществ, предложен подход к моделированию задачи управления динамикой биомассы фитопланктона с помощью функции влияния на освещенность.

**Abstract.** There are many models that describe the control of phytoplankton biomass dynamics with respect to photosynthesis and nutrient nutrition, and the least attention is paid to the effect of illumination, which is explained by the difficulties of influencing the illumination of large water surfaces. The features of the dynamics of phytoplankton distribution under the influence of illumination and the density of available biogenic substances are considered, an approach to modeling the problem of controlling the dynamics of phytoplankton biomass using the function of influence on illumination is proposed.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, биологическое разнообразие, модель управления, освещенность, водоросль, фитопланктон.

**Keywords:** mathematical modeling, biological diversity, management model, illumination, algae, phytoplankton.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее востребованных в исследованиях областей биологии и агрэкологии является моделирование продукционного процесса растений, что определяется практической значимостью таких моделей для оптимизации агрокультуры и тепличного хозяйства и изначально задачи оптимального управления биологическим сообществом возникали из нужд сельского хозяйства и животноводства. Математические модели здесь используются в качестве инструмента выбора оптимальной стратегии выполнения сельскохозяйственных мероприятий: орошения, полива, внесения удобрений и т.д. с целью получения максимального урожая. Для контролируемого хозяйства характерно построение модели, описывающей весь цикл процессов при заданных ограничениях, благодаря которой оптимальный алгоритм управления культурой может быть задан практически на всё время вегетации. Если моделируется посев в открытом грунте, на который оказывают влияние непредсказуемые

погодные условия, агробиоценоз нуждается в оперативном управлении, для него используются динамические модели, допускающие оперативное изменение параметров и, возможно, структуры модели в соответствии с изменениями погодных условий. Всю систему происходящих в агробиоценозе процессов обычно представляют в виде блочной иерархической структуры, где выделяют биотический и абиотический блоки.

Совсем другие задачи управления биологическим сообществом возникают в «диких» условиях, с минимальным воздействием человека. Такими могут быть, например, водные сообщества фито- и зоопланктона, водорослей.

Модели роста микроводорослей обычно строятся на основе уравнения баланса углерода в клетке. Его увеличение связано с процессом фотосинтеза, а потери обусловлены тратами на дыхание и экскрецию. Различие между поступлением и потерями определяет изменение биомассы фитопланктона. Таким образом, в общем виде уравнение динамики биомассы можно записать следующим образом:

$$\text{фотосинтез-дыхание-экскреция} = \text{изменение биомассы}.$$

Первичное продуцирование представляет собой синтез органического вещества в экосистемах. Весь процесс фотосинтеза в упрощенном виде можно записать следующим образом (Алимов, 1989):



При расщеплении воды образуется газообразный кислород, из двуокиси углерода и восстановленного из воды водорода синтезируются углеводы и вновь образуется вода (1). В темноте фотосинтез прекращается, прекращается и потребление  $\text{CO}_2$  из среды и выделение эквивалентного количества кислорода. Процессы дыхания у растений в темноте идут с той же скоростью, что и на свету. Поэтому, сравнивая результаты жизнедеятельности водного сообщества на свету и в темноте, можно рассчитать значение первичной продукции. Как видно из уравнения, для синтеза органического вещества из двуокиси углерода и воды необходим источник энергии – свет. Утилизация энергии света является характерной особенностью фотосинтеза.

Науке известно около 30 тысяч видов водорослей [1–3]. Некоторые из них употребляются человеком в пищу уже сотни веков. Из других видов мы добываем такие ценные виды сырья, как агар, карраген, йод. Без многих видов не существовала бы передовая фармацевтика и косметология. А также водоросли приносят большую пользу в сельском хозяйстве – удобрения с ними вносят с собой азотоусвояющие бактерии, которые увеличивают плодородие почвы. Этим объясняется развитие производства водорослей в промысловых водохранилищах, где в отличие от морских и океанических пространств, влиять на освещенность водной поверхности возможно.

В работе Krause-Jensen и Sand-Jensen 1998 года проведено исследование, которое преследовало следующие две основные цели: 1) проверить возможность существования общей зависимости между концентрацией хлорофилла *a* (*Chl\_a*), поглощением света и валовым фотосинтезом для любого водного растительного сообщества; 2) оценить связь между максимумом биомассы и валовым фотосинтезом различных водных растительных сообществ.

В работах Ризниченко Г.Ю. и Рубина А.Б. [2, 3] показано, что контроль лишь за концентрацией кислорода не дает возможности сконструировать управление, обеспечивающее устойчивость стационарного режима при больших возмущениях начальных данных. Для такого управления необходима регистрация концентрации субстрата *s*. Асимптотическую устойчивость стационарного режима может обеспечить лишь управление переменной структуры. Из исследований же Шиловой Н.А. [4] видно, что при увеличении максимального уровня освещенности происходит более интенсивный рост биомассы водорослей, что дает возможность сократить издержки, связанные с использованием искусственного освещения. При уменьшении значения коэффициента эффективности, который отражает выход биомассы водорослей на единицу потребленного субстрата, не происходит значительных изменений интенсивности роста биомассы водорослей. Данное изменение незначительно отражается на сроках пределов освещенности и на прибыли. Довольно интересен вывод о том, что уменьшение показателей, отвечающих за изменение с течением времени функции удельной скорости роста, приводит к увеличению расходов на освещение и, соответственно, к снижению прибыли, из-за чего придется удерживать максимальный уровень освещенности на месяц дольше, что отразится на интенсивности процессов роста. При этом в указанных моделях не учитывается влияние загрязненности водой или вертикальное распределение планктона в среде [5].

## II. ДИНАМИКА БИОМАСС ПЛАНКТОНА В АЗОВСКОМ МОРЕ С УЧЕТОМ ФАКТОРА ОСВЕЩЕННОСТИ

Основную роль при перемещении веществ в воде играет диффузия, в первую очередь, турбулентная. Фитопланктон и минеральные вещества пассивно перемещаются вследствие молекулярной и турбулентной диффузии. Турбулентная диффузия играет основную роль, так как коэффициенты турбулентной диффузии на несколько порядков больше, чем молекулярной. От пространственного распределения фитопланктона существенно зависит первичная продукция и биопродуктивность во-

доема. В свою очередь, продуктивность фитопланктона в значительной мере определяется процессом потребления минеральных веществ в ходе создания растительно-го организма в период фотосинтеза, который, в свою очередь, зависит от освещенности или иначе от фотосинтетически активной радиации (ФАР). Во многих исследованиях полагается, что солнечного света для фотосинтеза достаточно, но его ослабление в воде может быть разным, а это во многом определяет распределение фитопланктона в воде по глубине. Определенную регулирующую роль для жизненных процессов играет температура воды. Таким образом, из факторов окружающей среды логично учитывать минеральное питание, освещенность и температуру.

В работах Чистякова А.Е., показано, что концентрации фитопланкtonных популяций в значительной степени зависит от скорости движения водной среды, а также от структуры течений, что соответствует многочисленным наблюдениям и значимости турбулентной диффузии для процесса фотосинтеза. Оценено, как видно из рис. 1, влияние повышения температуры воды на ее биологическую очистку путем альголизации зеленых водорослей, вытесняющих токсичные синезеленые. На основе мониторинга водной акватории построены трехмерные математические модели движения водной среды, предназначенные для прогнозирования возможных сценариев развития экосистемы Азовского моря для избегания возникновения областей анаэробного заражения и принятия своевременных мер для их локализации [5, 14].

По данным экспедиционных исследований ЮНЦ РАН в августе 2019 г., на акватории Азовского моря соленость менялась от 12,5 до 16,4 PSU, температура составляла 23,9–24 °C.

Изучение «цветений» микроводорослей в Азовском море имеет несколько направлений, требующих отдельного исследования. Не касаясь методов дистанционного мониторинга, вопросов определения токсинов микроводорослей и медицинских аспектов последствий их воздействия на организм человека, в данной работе мы обобщили лишь отдельные гидробиологические аспекты изучения этого явления в Азовском море. Азовское море представляет собой мелководный водоем с относительно большим притоком пресных вод и удаленной связью с Мировым океаном. По физико-географическим и гидрологическим признакам его разделяют на два района: собственно море (считающееся, по мнению некоторых исследователей, придаточным водоемом Чёрного моря) и Таганрогский залив, являющийся эстуарием реки Дон. Две крупные реки, впадающие в Азовское море – Дон и Кубань, – привносят большое количество биогенных веществ, что приводит к существенной эвтрофикации бассейна. Небольшие глубины Азовского моря и, как следствие, хорошая прогреваемость вод, наряду с высокой биологической продуктивностью, приводят к ежегодным «цветениям» воды как в заливе, так и в море. Учитывая описанные выше физико-географические и гидрологические особенности, можно сделать вывод, что флора микроводорослей Азовского моря формируется как из солоноватоводно-морских, так и пресноводных видов. Значительную роль играет и водообмен с Чёрным морем, откуда регулярно поступают типично морские виды. Многие виды микроводорослей (морские и пресноводные) имеют широкий диапазон толерантности по отношению к солености вод [6, 7, 10–12].

Поскольку получение архивных спутниковых данных не всегда возможно, то велись наблюдения и анализировались снимки с нескольких спутников в реальном времени. Чтобы оценить значимость освещенности в моделях управления плотностью биомассы фитопланктона на примере большого и неглубокого относительно водоёма в 2020–2021 гг. были проведены наблюдения за поверхностью Азовского моря с помощью нескольких спутников. Данные наблюдения также позволяют соотнести их результаты с результатами многочисленных исследований акватории Азовского моря различными учеными.

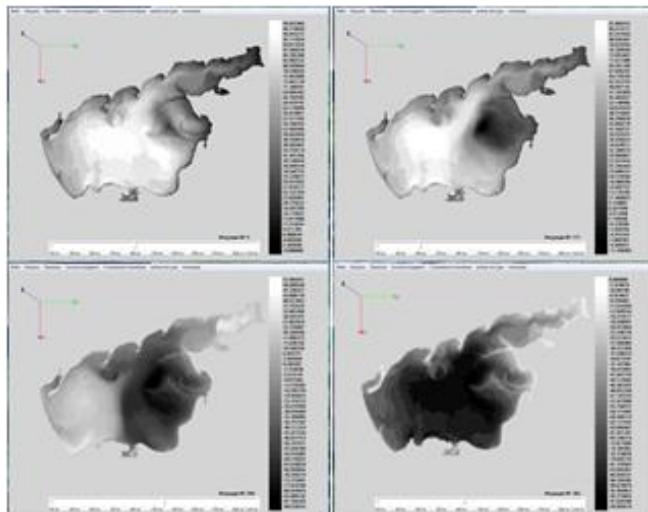


Рис. 1. Распределение концентраций синезеленой и зеленой водорослей, временной интервал  $T=2, 39, 70, 122$  дней

Оценка освещенности поверхности моря со спутников чаще всего затруднена облачностью, однако и этот фактор говорит многое о биоразнообразии планктонных популяций в конкретном водоеме.

Наблюдения с мая по сентябрь 2021 года по спутниковым снимкам дали наибольшее количество ясных погодных условий для анализа.

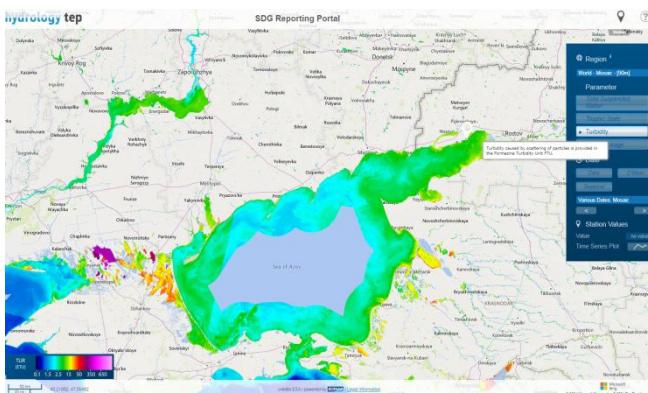


Рис. 2. Замутненность поверхности Азовского моря

Замутненность поверхности Азовского моря на рис. 2 показывает, что наименьшая чистота воды и наибольшая плотность водорослей наблюдается в Таганрогском заливе, юго-западной и восточной частях прибрежной линии. Это объяснимо с точки зрения промышленной застройки и густонаселенности побережья, а также меньшей глубины водоёма в этих местах.

При этом анализ распределения хлорофилла, который непосредственно говорит об эффективности процесса фотосинтеза, показал, как видно на рис. 2, некоторое отличие – распределение концентрации хлорофилла в целом соответствует замутненности поверхности водоема, но происходит более равномерно.

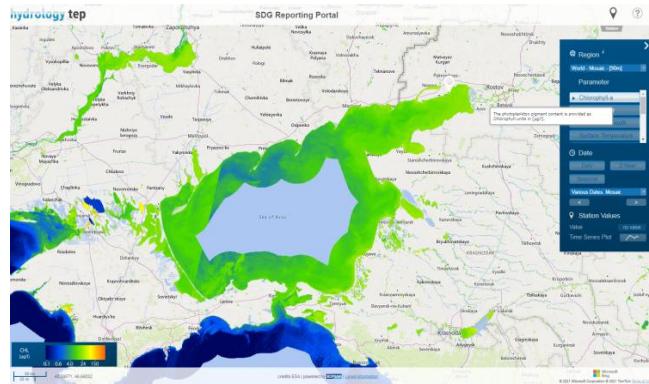


Рис. 3. Концентрация хлорофилла в прибрежной зоне Азовского моря

При малой глубине высокая освещенность влияет на температуру воды, что отражается и на большем биоразнообразии флоры и фауны.

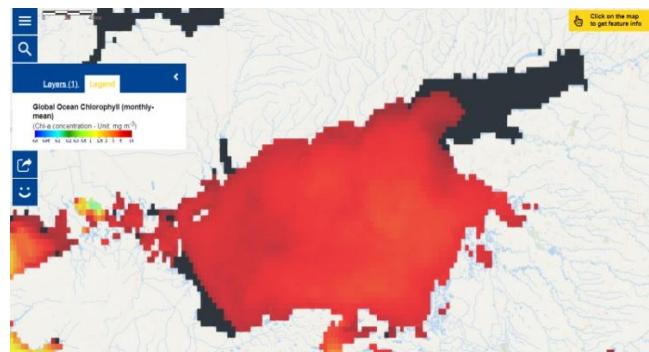


Рис. 4. Среднемесячная концентрация хлорофилла в Азовском море в 2021 г.

Распределение среднемесячной концентрации хлорофилла (рис. 4) в 2021 году в Азовском море показывает наибольшую плотность в наиболее густонаселенных областях побережья, что в свою очередь, коррелирует с распределением биогенных веществ.

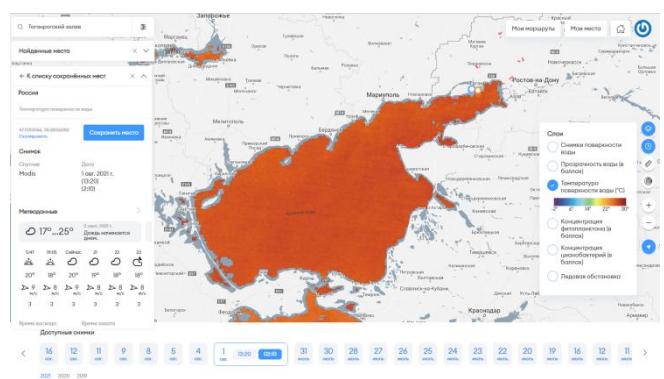


Рис. 5. Температура поверхности воды в Азовском море 01.08.2021 г.

Относительно равномерное распределение концентрации хлорофилла на поверхности водоема с различными перепадами глубин позволяет сделать предположение, что большее значение имеет освещенность, а не температура воды. Конечно, здесь следует учитывать скорость и структуру движения водной среды, изученные ранее, а также ежегодные изменения в картине местности. Как видно на рис. 5, распределение температуры поверхности водоема относительно равномерное, несмотря на перепады глубин.

Интересно, что распределение вредоносных водорослей по спутниковым снимкам отличается от распределения хлорофилла и даже уровня замутненности (рис. 6).

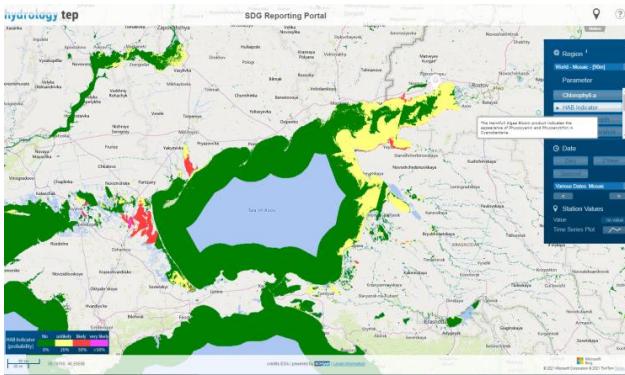


Рис. 6. Цветение вредоносных водорослей в прибрежной зоне Азовского моря

Как известно, вредоносные водоросли влияют на зоометрию водохранилищ. Большинство спутниковых данных по градиенту отслеживают распространение фитопланктона и по снимкам с трудом удается отделить фитопланктон от крупных водорослей. Бурное развитие водорослей и фитопланктона при уменьшении количества пресноводных рыб в Азовском море говорит о том, что значительно уменьшился объем зоопланктона. В свою очередь, уменьшение количества пресноводных видов рыб связано с осолонением водоема.

### III. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ БИОМАССОЙ

Наша задача – построить простую модель управления динамикой биомассы водорослей с помощью влияния на освещенность и показать влияние освещенности и на концентрацию биогенных веществ.

Обозначим символом  $N(t)$  биомассу водоросли,  $S(t)$  – концентрацию биогенных элементов в среде в момент  $t$ . В качестве параметра управления выступит функция  $u(t)$ , которая характеризует изменение уровня освещенности в единицу времени и удовлетворяет ограничению  $u(0) \leq u(t) \leq u_{max}$ , где  $u_{max}$  – максимальное значение уровня освещения.

При данных условиях управляемая модель динамики развития биомассы водорослей описывается системой дифференциальных уравнений (2):

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \mu(t)\varphi(s(t))N(t) \left(1 - \frac{N(t)}{N_{max}}\right) u(t) + D_N \frac{\partial^2 N}{\partial z^2}, \\ \frac{ds}{dt} = G(S_N - S(t)) - \frac{\mu(t)\varphi(s(t))N(t)}{M} + D_S \frac{\partial^2 S}{\partial z^2}, \end{cases} \quad (2)$$

где зависимость  $\varphi(s(t))$  – это концентрация биогенов, поглощаемых водорослями за единицу времени, необходимая для их развития и, по сути, является трофической функцией, уменьшение которой зависит от дыхания, экскреции, смертности, выедания зоопланктоном, оседанием; коэффициент  $M$  – это выход биомассы водорослей на единицу потребленных биогенных элементов; коэффициент  $G$  отражает гидродинамический режим рассматриваемой системы, коэффициент  $S_N$  – первоначальная концентрация биогенных элементов в среде до начала в ней биологических процессов, связанных с жизнедеятельностью водорослей;  $D_N, D_S$  – коэффициенты диффузии фитопланктона и биогенов соответственно;  $z$  – концентрация кислорода. Функция  $u(t)$  определяет качественную перестройку временной динамики системы и зависит от освещенности и температуры среды водоёма  $\mu(t)$ .

Целью управления здесь является максимизация функционала  $J(u(t))$ , который выражает прибыль планктонного предприятия, полученную от продажи сырья из водорослей за рассматриваемый интервал времени (3):

$$J(u) = \int_0^T (\alpha N(t) - \beta u(t)) dt + \gamma N(T) \rightarrow \text{sup.} \quad (3)$$

Здесь  $\alpha$  – стоимость единицы биомассы водоросли;  $\beta$  – стоимость затрат на освещение;  $\gamma$  – стоимость биомассы  $N(t)$  за конечный период  $T$ .

В случае роста биомассы фитопланктона, лимитированного световыми условиями, скорость роста определяется переменным параметром углерода, а не азота (4). А это означает необходимость введения уравнения, задающего скорость изменения углерода вида:

$$\frac{d(C_U)}{dt} = (A_{C,U}^m) \left( \frac{U}{U_s + U} \right) - v_c(C_U). \quad (4)$$

Здесь  $U$  – интенсивность света,  $U_s$  – интенсивность света, при которой достигается насыщение. Углерод удовлетворяет энергетические потребности клетки и служит одним из биогенных элементов, необходимых ей для роста, что, в свою очередь, влияет на поглощаемость света видом. Что касается энергетических потребностей, то углерод используется для того, чтобы покрыть затраты на метаболизм и дыхание. Кроме того, он используется в качестве строительного материала. Скорость утилизации углерода задается слагаемыми

$$(Metab_C)V + (G_C) * \frac{dV}{dt}.$$

С другой стороны, скорость его утилизации равна

$$(C_U) \left( v_c - \frac{dV}{dt} \right).$$

С помощью этих двух соотношений можно получить выражение для удельной скорости роста при световом лимитировании (5):

$$\mu \equiv \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} = (v_c(C_U) - Metab_C) / ((C_U) + (G_C)). \quad (5)$$

Для подавляющего большинства прикладных задач управления, связанных с реальными объектами, существует и, как правило, не один набор управляющих функций

$$J(u) = u(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)), \quad (6)$$

который решает задачу управления (с фиксированным или нефиксированным временем управления). По этой причине возникает возможность выбора из всех решений задачи управления такого решения (т.е. такого набора управляющих функций), которое было бы в каком-то смысле наиболее выгодным. В этом случае приходим к задаче оптимального управления.

Для того, что сформулировать задачу оптимального управления, необходимо задать условие, которое позволяет отличать друг от друга более и менее выгодные решения данной задачи. Этой цели служит критерий оптимальности (критерий качества управления или целевой функционал)

$$J(u) = \int_{t_0}^T f_0(t, y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)) dt, \quad (7)$$

в котором  $f_0$  – фиксированная функция  $n+m+1$  переменных, обладающая такими свойствами, чтобы обеспечить существование интеграла. Признаком большей или меньшей выгоды выбора управления  $u$  будет служить значение интегрального функционала (7), вычисленного на этом управлении, т.е. число  $I(u)$ . Для определенности будем считать, что чем больше значение критерия оптимальности  $I(u)$ , тем более выгодным является данное управление  $u$ . Тогда самым выгодным будет управление, которое доставляет наибольшее возможное значение интегральному функционалу (7).

Верхний предел интегрирования  $T$  в интегралах из (3) и (7) в зависимости от типа задачи управления может быть фиксированным или нет. Во втором случае целевой функционал зависит не только от управления  $u$ , но и от конечного момента времени  $T$  (не  $I(u)$ , а  $I(u, T)$ ).

Итак, задача оптимального управления для системы дифференциальных уравнений (2) заключается в максимизации интегрального функционала (3) (или (7) в случае управления не только освещенностью, а, например, количеством биогенных веществ) на множестве всех допустимых управлений, переводящих систему (2) из заданного начального состояния в конечное. С математической точки зрения эта задача является специального вида задачей оптимизации интегрального функционала на определенном множестве функционального пространства кусочно-непрерывных управляющих функций.

В данной работе авторы отталкивались от гипотезы, что в качестве функции управления на динамику биомассы фитопланктона можно взять параметр освещенности. Однако, роль биогенных веществ, скорости движения водной среды, а также структуры течений нельзя преуменьшать и логично использование определенного типа необходимого условия экстремума, которое дает возможность среди всех возможных допустимых процессов выделить те, которые могут претендовать на роль оптимальных, известного в литературе как принцип максимума Понтрягина. Для определенного класса задач управления принцип максимума является не только необходимым, но и достаточным условием оптимальности. Существуют варианты принципа максимума для различных задач оптимального управления – с фиксированным и нефиксированным временем управления, для автономных и неавтономных систем, для задач, в

которых начальное и конечное состояния системы не обязательно жестко фиксированы, позволяющие определить не только функции оптимального управления, но и оптимальные процессы.

Возникает и другая задача управления сообществом фитопланктона или микроводорослей [8, 9], вызванная «цветением» воды – известным природным явлением, являющимся следствием массового размножения планктонных микроскопических водорослей, пигменты которых окрашивают воду в тот или иной цвет. Этот процесс может быть почти незамечен невооруженным глазом, но чаще всего изменяет цвет воды на коричневый, зеленый, желтый, или даже оранжевый или красный. Часто «цветение» напоминает градиентное перемешивание краски, плавающей на поверхности воды. Такие «цветения» наблюдаются в пресных, морских и солоноватых водоемах, поскольку может быть спровоцировано развитием разных видов из различных таксономических групп. Даже если «цветение» воды вызывают не токсичные виды, массовая численность клеток фитопланктона в водной толще (когда плотность популяции может достигать 300–500 млн кл/м<sup>3</sup>, а биомасса достигать нескольких сотен грамм на кубометр) представляет опасность для нормального функционирования экосистемы. Игнорирование проблемы «цветения» воды может привести к крайне негативным последствиям и в вопросах водоснабжения, что особенно актуально для прибрежных поселений и городов. Так, массовое развитие цианопрокариот в Цимлянском водохранилище в октябре 2009 г., исследованное учеными ЮНЦ РАН, совпавшее с устойчивой ветровой активностью, привело к остановке насосов и прекращению водоснабжения г. Волгодонска [10, 11]. А во второй половине 2015 г. многие жители г. Таганрога, г. Азова, с. Кагальник, с. ПортКатон и других населенных пунктов, расположенных на берегу Таганрогского залива, отметили, что с акватории залива периодически доносился запах, напоминающий запах дуста. Одна из сторон изучения «цветения» воды связана с проникновением чужеродных видов, заносимых в Азовское море с балластными водами судов [10–13]. Поскольку во многих портах России контроль за сменой балластных вод проводится недостаточно тщательно, при сбросе этих вод в портах перед загрузкой на акваторию попадают чужеродные виды, способные не только адаптироваться, но и составить конкуренцию автохтонным видам. Проследить «вселение» планктонных водорослей довольно сложно, и это связано как с мелкими размерами клеток и значительной мозаичностью в распределении фитопланктона, так и с высокой скоростью размножения и смены доминирующих видов. В случае если в период массового развития вида-вселенца в бассейне не проходила гидробиологическая экспедиция, его вегетация может остаться незамеченной исследователями. Осложняет дело и тот факт, что исследования микроводорослей в различных районах морей проходят очень неравномерно [13]. В этом случае построение модели основывается на минимизации функционала, отвечающего за увеличение биомассы. Но в отличие от фитопланктона освещенность водорослей описать поверхностью светом не достаточно – здесь процесс фотосинтеза обуславливается непосредственно видом водоросли, её конкурентным разнообразием в сообществе и особенностями водной акватории [14].

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно, задача управления биологическим сообществом на примере фитопланктона и микроводорослей имеет широкое применение и различные пути решения. Из построенной модели видно, что управление лишь освещенностью недостаточно для увеличения биомассы водорослей. Развитие исследования видится в усложнении модели (2)-(3). Следует усложнить функционал управления за счет не просто концентрации биогенных веществ и факторов среды, но также с помощью моделирования гидродинамических с учетом процессов переноса солей и тепла [14]. При этом как показывают, результаты наблюдений, в том числе зарубежных ученых, освещенность напрямую влияет на разложение углекислого газа и высвобождение кислорода, который уже в масштабах мирового океана влияет на интенсивность образования облаков, что замыкает природный цикл, в свою очередь, влияет на освещенность водоемов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ризниченко Г.Ю. Динамические модели в биологии. – <http://www.dmb.biophys.msu.ru>.
2. Ризниченко Г.Ю. Математические модели первичных процессов фотосинтеза // Итоги науки и техники. Серия Биофизика. – М., 1991. – Т. 31. – 162 с.
3. Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б. Математические модели биологических продукционных процессов. – М., 1993. – 301 с.
4. Шилова Н.А. Алгоритм для оптимального управления ростом биомассы водорослей // Программные продукты и системы. – 2010. – № 3. – <http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=2582>.
5. Ляпунова И.А., Никитина А.В., Филина А.А. Моделирование процесса распространения загрязняющих веществ и изучение их влияния на экологическое состояние мелководного водоема // Перспектива–2021: Материалы международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – 2021. – С. 182-187.
6. Винберг Г.Г. Биологическая продуктивность водоемов // Экология. – 1983. – № 3. – С. 3-12.
7. Ильичев В.Г., Даشكевич Л.В. Гидрохимический режим Азовского моря: компьютерные эксперименты // Природа. – 2015. – № 12. – С. 18-22.
8. Luck R.F. Evaluation of natural enemies for biological control: a behavioral approach // Trends in Ecology and Evolution. – 1990. – Vol. 5, No. 4. – P. 196-199. (In English). – [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(90\)90210-5](https://doi.org/10.1016/0169-5347(90)90210-5).
9. Berryman A.A. The theoretical foundations of biological control / Hawkins B.A., Cornell H.V., eds. Theoretical Approaches to Biological Control. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1999. – P. 3–21. (In English).
10. Матищов Г.Г., Степаньян О.В., Поважный В.В., Ковалёва, Г.В., Кренёва К.В. Функционирование экосистемы Азовского моря в зимний период // Доклады Академии наук. – 2007. – Т. 413, № 1. – С. 112-115.
11. Матищов Г.Г., Ковалёва Г.В., Ясакова О.Н. Аномальное осолонение в Таганрогском эстуарии и дельте Дона // Наука Юга России (Вестник Южного научного центра). – 2016. – Т. 12, № 1. – С. 43-50.
12. Ковалёва Г.В. Виды-вселенцы в фитопланктоне Азово-Черноморского бассейна: проблемы изучения // Сб. статей Междунаучн. конф. "Окружающая среда и человек" памяти чл.-корр. РАН Д.Г. Матищова (г. Ростов-на-Дону, 5-8 сент. 2016 г.) / [гл. ред. акад. Г.Г. Матищов]. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2016. – С. 183-190.
13. Ковалёва Г.В. Проблема «цветения» воды в Азовском море // Труды Южного научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 8. – С. 122-148.
14. Чистяков А.Е., Никитина А.В., Белова Ю.В., Литвинов В.Н., Филина А.А. Математическое моделирование гидродинамических процессов мелководных водоёмов с учетом процессов переноса солей и тепла // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020): Сборник трудов по материалам VI Международной конференции и молодежной школы (г. Самара, 26-29 мая); в 4 т. / Самар. нац.-исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т), Ин-т систем. образ. изобр. РАН-фил. ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН; [под ред. В.А. Соболева]. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2020. – Т. 3. Математическое моделирование физико-технических процессов и систем. – 2020. – С. 784-791.

# Исследование современных подходов и разработка алгоритма для бесконтактного измерения геометрических параметров объектов на цифровом изображении

**Самойлов Алексей Николаевич**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*asamoylov@sedu.ru*

**Онищенко Стефан Владимирович**  
Адыгейский государственный  
университет  
Майкоп, Россия  
*osv@adygnet.ru*

**Козловский Александр Вячеславович**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*kozlovskiy@sedu.ru*

**Гаряядьев Али Мухаммедович**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*garyagdyev@sedu.ru*

**Аннотация.** В данной работе были рассмотрены некоторые из существующих методов и подходов для реализации процедуры бесконтактных измерений различных объектов. В результате проведенных исследований было установлено что наибольшей точностью обладает фотограмметрический подход, одним из достоинств которого является простота его использования, поскольку его организация не требует дополнительных измерительно-фиксирующих устройств. На основании этого предлагается произвести разработку предлагаемой системы бесконтактных измерений геометрических параметров на изображении, применительно к задаче определения геометрических параметров круглых лесоматериалов, расположенных в штабелях.

**Abstract.** In this paper, some of the existing methods and approaches for implementing the procedure of contactless measurements of various objects were considered. As a result of the conducted research, it was found that the photogrammetric approach has the greatest accuracy, one of the advantages of which is its ease of use, since its organization does not require additional measuring and fixing devices. Based on this, it is proposed to develop a proposed system of non-contact measurements of geometric parameters in the image, in relation to the problem of determining the geometric parameters of round timber located in stacks.

**Ключевые слова:** бесконтактные методы измерения, геометрические параметры объектов, лидар, метод теневого измерения, фотограмметрия.

**Keywords:** contactless measurement methods, geometric parameters of objects, lidar, shadow measurement method, photogrammetry .

## I. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире все более широкое распространение получает процесс автоматизации различных областей производства и сфер социально-экономической

жизни граждан. Одним из многочисленных примеров данного процесса может послужить область, связанная с организацией измерения геометрических параметров различных объектов. Для решения комплексов подобных задач может быть использовано множество существующих методов и подходов, одним из которых является использование бесконтактного подхода по организации измерений параметров объектов, позволяющего без организации дополнительных трудоемких действий получить искомые результаты [1].

Бесконтактный подход можно подразделить на два больших класса состоящих из активных и пассивных способов получения информации об измеряемом объекте. Поскольку организация активных способов требует приобретения специализированных устройств, например таких как РМД-камеры [2, 3], лазерные системы измерения, системы основанные на принципе использования стереозрения, то становится понятно, что наиболее оптимальным будет использование совокупности пассивных способов измерения, позволяющих ограничиваться лишь изображениями измеряемых объектов, полученных с простых фоторегиструирующих устройств, обладающих достаточным разрешением для получения снимков, для которых можно было бы использовать методы из теории распознавания образов [4].

Еще одним возможным решением данной задачи является использование явления размытия контуров объектов на изображении, основным недостатком которого является высокая сложность алгоритмов организации данного подхода.

Развитие данного направления позволило производить в автоматизированном режиме идентификацию различных объектов на изображениях, производить их подсчет, определять их размеры и классифицировать их по типу,

что может применяться в различных отраслях и сферах жизни таких как: архитектура, дорожное строительство, медицина, различные системы безопасности, системы распознавания дорожных знаков и регистрационных номеров автомобилей и т.д.

Становится понятно, что создание некоторых комплексов, позволяющих производить учет необходимых нам объектов является актуальной задачей. Однако, предварительным этапом является разработка методов и алгоритмов, на основе которых будет происходить функционирование данных устройств учета и измерения.

В качестве задачи, для которой необходимо разработать метод можно рассмотреть задачу подсчета количества бревен в штабеле круглых лесоматериалов, и определения их геометрических параметров таких как площади торцов бревен и объем каждого из измеряемых бревен, поскольку в предыдущих работах была рассмотрена актуальность решения данной задачи [5–].

Существующие методы для решения задачи подсчета количества круглых лесоматериалов и определения их геометрических параметров реализуются за счет использования нескольких подходов, в результате чего возрастают сложность настройки исходного подхода и требуется большая квалификация обслуживающего персонала, что приводит к снижению точности получаемых результатов [7, 9], в связи с чем предлагается произвести разработку подхода, позволяющего комплексно определять такие параметры складированных круглых лесоматериалов как подсчет их количества, площадь торцевых сечений, объемы бревен и всего штабеля в целом.

## II. ИССЛЕДОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ ПО ОРГАНИЗАЦИИ БЕСКОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для начал рассмотрим теневой метод измерения, который был описан в статье, авторами которой являются Ашмарин Ю.А., Виноградова А.А., Коваленко П.П. и Недоцук Г.А. [10]. Его суть заключается в том, что объект, над которым производятся измерения, помещают между источником света и приемной камерой. Таким образом размер объекта определяют по полученной разнице между границами теневых контуров самого объекта. Для проведения данного метода необходимо, чтобы система обработки изображений включала в себя компоненты: камеру, объектив, освещение, компьютер и программное обеспечение. Несмотря на то, что автор отмечает тот факт, что метод реализуется относительно просто и надежен в эксплуатации, стоит отметить, что он недостаточно мобилен и вариативен в использовании.

Проекционный контроль геометрических параметров изделий. Жуков Е.М., Алдушина М.А. и Минаев А.И. в своей статье [11] отмечают, что данный метод условно делится на две группы: метод оптического проекционного контроля и метод прямого проекционного контроля. Их графическое представление показано на рис. 1.

В случае схемы прямого проекционного контроля (рис. 1,б) источник монохромного, коллинеарного излучения 2 освещает изделие 1, при этом часть излучения попадает на ПЗС-матрицу, а часть задерживает изделие, в результате чего контур изделия формируется на поверхности ПЗС-матрицы.

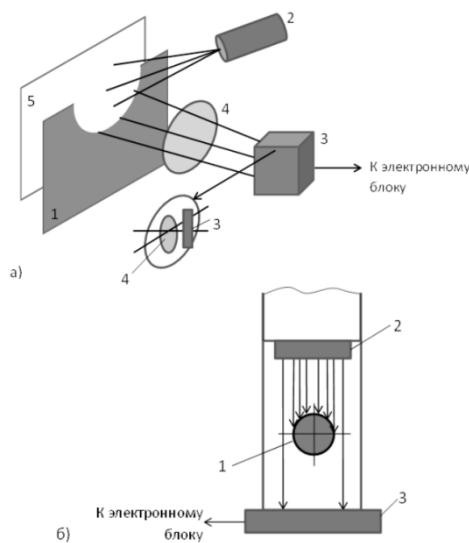


Рис. 1. Методы проекционного контроля геометрии объектов: а) оптический проекционный контроль, б) прямой проекционный контроль

Для измерения микрообъектов и объектов крупного габарита есть возможность использовать свойство проекционного оптического метода, которое заключается в том, что проекция измеряемого объекта может увеличиваться в размерах или уменьшаться. Это вытекает из-за несоответствия изображения на поверхности матрицы с контуром профиля измеряемого объекта, в соответствии с коэффициентом увеличения оптической системы, изменения которого могут происходить в конкретных пределах и принимать значения, которые больше или меньше единицы.

Недостатки, имеющиеся в оптическом методе, отсутствуют в прямом проекционном методе. Другими словами, в данном случае не наблюдается преломление лучей, которые создают контур профиля на ПЗС-матрице. В связи с этим изображение и контур полностью соответствуют, не считая погрешности, которая равна длине волны. Исходя из рассмотренных особенностей данный метод можно применять при измерении объектов небольших размеров, имея при этом высокую точность.

Таким образом, метод бесконтактного проекционного контроля геометрических параметров изделий является приемлемым для определения метрических характеристик объектов, но при этом также как и теневой метод измерения не имеет достаточную мобильность и обуславливается множеством ограничений, в следствие которых мы имеем мало вариативный функционал.

На ряду с вышеупомянутыми методами для бесконтактного измерения объектов используют технологию лидара. В ее основе лежит технология дистанционного зондирования, использующая лазерный импульс, который в свою очередь и собирает измерения. На основе полученных измерений и данных создаются карты и 3D-модели объектов. Данная система выполняет расчет времени, требуемого для преодоления выпущенным светом расстояния до объекта и отражения его обратно в приемник. Чтобы рассчитать расстояние используют скорость света. Использование лидара способствует более распространенному внедрению приложений автоматизации. Технология лидара имеет шир-

рокий спектр применения от геодезии до решения прикладных задач в космосе. К преимуществам данной системы можно отнести:

- скорость и точность сбора данных;
- проникновение;
- независимость от времени суток;
- не имеет геометрических искажений;
- легкая интеграция с различными методами сбора информации;
- малая зависимость от человека.

Но, как и любая система и технология лидар имеет ряд минусов:

- высокая стоимость;
- зависимость от плотности тумана, дождя и снега;
- требует большие вычислительные мощности для обработки полученной информации;
- ограничение работы в зависимости от высоты, которая варьируется установленными рабочими характеристиками.

Метод бесконтактного измерения при помощи использования лидара при всех своих положительных качествах имеет значимый и актуальный в наше время минус. Этим недостатком является очень высокая стоимость, что уже упоминалось ранее, которая влияет на распространение применения данного метода.

Следующим методом бесконтактного измерения объектов является фотограмметрический метод. В своем учебнике [12] Лимонов А.Н. и Гаврилова Л.А. определили, что фотограмметрия является научным и производственным направлением, которое изучает методы определения метрических характеристик и расположения рассматриваемого объекта в пространстве на основе изображения, полученного на снимке.

Применение фотограмметрии может быть использовано в трех направлениях, таких как:

1. Фототопография. В данном направлении создаются планово-картографические материалы с различным масштабом на основе аэро- или космических снимков. Данные материалы в дальнейшем используются для получения кадастровых планов, карт почвы и т.д.

2. Решение инженерных задач. Во втором направлении наиболее важную роль играет определение на основе снимка метрических особенностей и характеристик объекта. Эта информация необходима для:

- наблюдения деформации земной поверхности на рассматриваемом участке;
- реконструкции и реставрации сооружений и архитектуры на основе созданного плана фасада;
- определения объема работ при выполнении комплекса мер по экологическому и экономическому восстановлению земельных участков;
- паспортизации объектов с техническим назначением.

3. Ближняя фотограмметрия. Третье направление используется для решения прикладных задач, которые применяются в строительстве, медицине, криминалистике и т.п.

Ключевое отличие метода с использованием фотограмметрии заключается в том, что для получения характеристик объекта измеряют и анализируют его модель, а не сам объект. Качество точности полученных данных о метрических характеристиках объекта зависит от изобразительных параметров снимка, ее деформации и того насколько корректно описаны математически связи координат точек снимка и объекта. Из этого следует, что в процесс фотограмметрической съемки входит не только обработка полученных снимков, но и корректное исполнение фотосъемки.

Главным преимуществом фотограмметрического метода является получение наиболее высокой точности цифровых метрических характеристик объекта по имеющимся изображениям чем при непосредственном измерении объекта. Также без альтернативы остается тот факт, что при помощи рассматриваемого метода имеется возможность получать измерения из труднодоступных и недоступных для людей мест. Исходя из этого можно сказать, что фотограмметрический метод измерения и получения характеристик об объектах является практичным, точным и объективным, а также экономичным, что играет важную роль в современном мире. Таким образом, упомянутые положительные качества указывают на то, что использование фотограмметрии для решения прикладных задач в жизни человека является наиболее оптимальным и актуальным.

Фотограмметрия в современном представлении основывается на классической постановке задачи, а именно на определении формы и размера объекта по полученным изображениям. Но при этом данное понятие включает в себя более обширный смысл и значение, что следует из перехода от аналоговых методов обработки к цифровым компьютерным технологиям. В данном случае задачей фотограмметрии является вычисление на основе измеренных координат элемента изображения координат соответственной детали объекта в той или иной пространственной системе координат и в проекции, которая задана нами. В математическом плане данная задача заключается в перевычислении координат соответствующего элемента из одной системы в другую. Необходимо, чтобы математический аппарат, при помощи которого выполняется процедура перевычисления, был основан на аналитической связи координат элемента снимка и объекта. Эта связь в первую очередь распознается на основе того каким способом построено изображение, какие метрические свойства у снимка, а также какие условия и параметры его получения в процессе съемки.

Исходя из упомянутых аспектов и особенностей фотограмметрического метода его использование можно представить следующими этапами:

- Осуществление съемки. Оно производится при помощи съемочного оборудования, которое обладает определенными техническими параметрами, формирующими снимок по определенному закону построения изображения. Также играют роль

условия, в которых производится съемка, в соответствии с их характеристиками обуславливаются информационные свойства изображения.

- Фотограмметрические преобразования. На данном шаге на основе способа построения и получения снимка происходит преобразование при помощи программного обеспечения и технологических операций.
- Создание продукции заданного масштаба в той сфере, в которой мы используем данную методику. Масштаб в следствии фотограмметрической обработки снимка определяется погрешностью пространственных координат.

Рассмотренная очередность шагов фотограмметрического метода указывает на их взаимосвязь. Расчет первых двух этапов определяется заданной допустимой погрешностью пространственных координат элементов объектов.

С течением времени в истории человечества насчитывалось большое количество разнообразных и разноплановых приборов, использовавшихся для достижения результатов в фотограмметрических задачах. Но к концу двадцатого века был создан новый тип техники, использующийся в фотограмметрии, который вытеснил все аналоговые приборы и не полностью аналитические фотограмметрические приборы. Данным открытием являлись цифровые фотограмметрические системы (ЦФС). Их появление следовало из развития современной техники, а именно: увеличение объемов памяти компьютеров, возрастание их счетной способности, а также прорыв в компьютерной графике и цифровых методах записи изображений. О данном прогрессе и появлении цифровых фотограмметрических системах в своем учебном пособии рассказывает Краснопевцев Б.В. [13].

Цифровая фотограмметрическая система является программно-аппаратным комплексом, который предназначен для обработки при помощи фотограмметрического метода аэрокосмические и наземные фотосъемки. На рис. 2 можно увидеть, что отличие данной системы заключается лишь в наличии наблюдательной системы и возможностью использования в качестве устройства управления не только компьютерной мыши, но и специальных манипуляторов.



Рис. 2. Обобщенная блок-схема ЦФС

ЦФС обрабатывает изображения будучи уже в цифровом формате. Данные цифровые изображения изучаемых объектов получают при помощи цифровых камер с системами кадрового, лазерного или сканерного типа, либо в результате перевода аналогового файла в цифровой. При таком раскладе цифровой снимок является матрицей с элементами в виде чисел, которые ха-

рактеризуют плотность или цвет элементарного участка запечатленного объекта. К типу данных снимков можно отнести:

- кадровые снимки в аналоговом формате;
- кадровые снимки в цифровом формате;
- цифровые изображения, полученные сканерной системой;
- радиолокационные изображения.

В настоящее время в эксплуатации находятся такие цифровые фотограмметрические системы как: ЦФС Photomod, DVP и Realistic Map [14]. С каждым годом распространение их применения растет, что говорит об актуальности и необходимости дальнейшего развития науки в области фотограмметрии.

В ходе эксплуатации ЦФС возникает большое количество источников ошибок, которые необходимо учитывать и устранять. Произведем краткое рассмотрение существующих источников ошибок измерений цифровой фотограмметрической системы.

Первыми источниками является те, что вызывают ошибку снимка. Они способствуют возникновению отклонения в положениях точек на снимке от тех, которые соответствуют центральной проекции.

Ко второму типу источников можно отнести программные и инструментальные. Они вызывают ошибки, которые возникают вследствие введения в компьютер нестрогих программ. Другими словами, возникают ошибки измерительных приборов.

Третья группа источников включает в себя неправильное опознавание точек, что ведет к ошибкам и падению точности измерений фотограмметрическим методом. В определенных случаях для избежания данных ошибок необходимо проводить ряд мероприятий до начала замеров.

Четвертые источники ошибок вытекают из нарушения строгой теории обработки снимков. В случае необходимости ускорения процесса есть возможность отхода от параметров строгой обработки, но данный способ понижает точность получаемых результатов. Таким образом необходимо следить за введенными параметрами при настройке системы, чтобы добиться поставленных задач.

Одним из основных направлений развития ЦФС является реализация автоматизации процессов измерения в фототриангуляции. До возникновения фотограмметрических цифровых систем фототриангуляция использовалась для вычисления координат опорных точек, после ее стали использовать для расчета элементов внешнего ориентирования снимков. Данные элементы устанавливают ориентацию систем координат снимков в системе координат объекта, этим шагом и становятся возможными дальнейшие шаги по обработке полученных снимков.

В связи с этим предлагается произвести разработку фотограмметрической системы для измерений объектов на изображении, поскольку данный подход обладает достаточной точностью и не требует наличия дополнительных устройств фиксации и измерения.

### III. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Реализуемая система должна соответствовать требованиям и последовательности определенных действий. Для этого необходимо определить данные параметры и условия.

В первую очередь должно быть получено фото необходимых объектов при помощи фоторегистрирующих устройств. В нашем случае это будет камера телефона пользователя, характеристики которой не являются критичными в связи с достаточно большим приемлемым диапазоном качества изображения. Для наилучшего результата фото необходимо делать с перпендикулярного угла к торцам, но при полученных фотографиях с разных углов результат также является приемлемы. Расстояние от камеры до самого объекта также имеет достаточно большой показатель для удовлетворительного результата.

Полученное фото объекта посредством использования частного виртуального сервера Amazon Lightsail может быть отправлено в директорию устройства, на котором будет производиться обработка данного изображения. Используемый поставщик сервера предоставляет большой функционал к использованию и сохраняет при этом экономическую эффективность. Таким образом наше изображение и поступает на устройство обработки.

Устройством обработки и дальнейшего взаимодействия в нашем случае является ноутбук или персональный компьютер. На данных устройствах производится обучение сверточной нейронной сети при помощи сервиса Google Collabotory на основе сетя заготовленных изображений лесоматериалов. В результате обучения нейронная сеть будет готова к обработке поступающих изображений. Таким образом, в заранее обученную сверточную нейросеть будет необходимо загрузить полученное фото с камеры смартфона. Для данной операции необходимо обеспечить возможность взаимодействия пользователя с данной системой. В связи с этим требуется реализация графического интерфейса, в котором пользователь сможет использовать весь функционал программы. Графический интерфейс должен включать в себя: поле для ввода названия изображения и его формата, поле ввода точности определения предмета, поля ввода радиуса наибольшего торца и длины брусков, кнопки для распознания и сохранения результатов, а также поле для вывода обработанного изображения и необходимых полученных данных об объекте.

В результате реализации графического интерфейса пользователь сможет выбирать необходимое изображение для обработки и получения информации об объектах на нем, а также задавать необходимые параметры в виде наибольшего радиуса, длины брусьев и порога точности. После выбора фото загружается в обученную нейронную сеть, где на основе изученных данных она определяет количество предметов на фото, площадь и объем каждого из них, а также объем всех объектов в целом. Обработанная и полученная информация выводится в поле вывода графического интерфейса для ознакомления и использования ее пользователем. Также система выдает в поле вывода обработанное фото элементов с их разметкой для наглядности и точности про-

цесса. При необходимости пользователь может сохранить данное фото, указав в поле новое название, с которым изображение сохранится в папке системы, и нажать кнопку для его сохранения. Таким образом система имеет алгоритм, представленный на рис. 3.

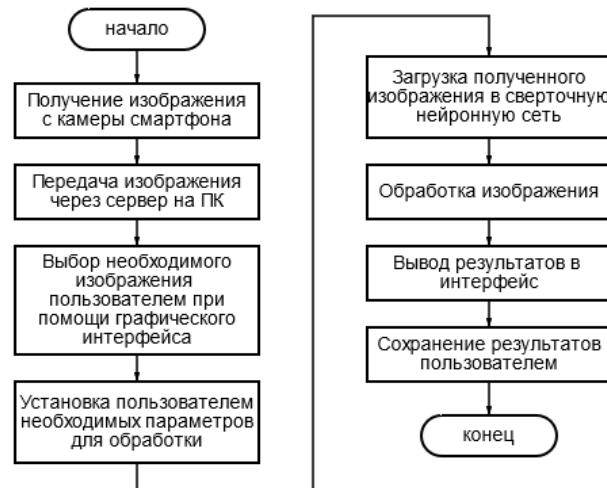


Рис. 3. Блок схема для алгоритма работы системы

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом в данной работе было проведено исследование некоторых существующих подходов к организации бесконтактных измерений различных объектов, в результате которого было установлено, что наименее затратным и при этом обладающим наибольшей точностью среди прочих является фотограмметрический подход, на основе которого было произведено проектирование системы бесконтактных измерений геометрических параметров объектов.

В дальнейшем предложенная система может быть реализована с использование различных аппаратных и программных средств, после чего будет необходимо провести ее тестирование для определения точности получаемых результатов измерения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Peter Katuč, Miroslav Dovica, Stanislav Slosarčík, Jozef Kováč. Comparision of Contact and Contactless Measuring Methods for Form Evaluation // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 48. – P. 273-279. – ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.514>.
2. Adam D., Nissan S. B., Friedman Z., Behar V. The Combined Effect of spatial compounding and nonlinear Filtering on the Speckle Reduction in Ultrasound Images// Ultrasonics. – 2006. – 44. – P. 166-181.
3. Beder Chr., Bartczak B. and Koch R. A Comparison of PMD-Cameras and Stereo-Vision for the Task of Surface Reconstruction using Patchlets // Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2007. – P. 1-8.
4. Чабан Л.Н. Теория и алгоритмы распознавания образов: учебное пособие. – М.: МИИГАиК. 2004. – 70 с.
5. Козловский А.В., Онищенко С.В., Авдеев В.Е. Исследование методов измерения круглых лесоматериалов // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Сборник статей VII Всероссийской научно-технической конференции. Таганрог, 05–11 апреля 2021 года. – Таганрог: ЮФУ, 2021. – С. 357-360.
6. Онищенко С.В., Козловский А.В. Исследование метода определения геометрических параметров объектов по предварительно обработанным цифровым изображениям // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2021): Сборник трудов XIX Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Ростов-на-Дону – Таганрог: ЮФУ, 2020. – С. 59-62.

7. Мельник Э.В., Онищенко С.В., Козловский А.В. Исследование возможности реализации мобильных комплексов для бесконтактного измерения геометрических параметров объектов // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Сборник статей VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Таганрог, 2022.
8. Herbon C., Tonries K., Stock B. Detection and segmentation of clustered objects by using iterative classification, segmentation, and Gaussian mixture models and application to wood log detection // Pattern Recognition. Springer International Publishing. – 2014. – P. 354-364.
9. Galsgaard B., Lundtoft D.H., Nikolov I., Nasrollahi K., Moeslund T.B. Circular Hough Transform and Local Circularity Measure for Weight Estimation of a Graph-Cut Based Wood Stack Measurement // IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, Waikoloa, HI, 2015. – P. 686-693.
10. Ашмарин Ю.А., Виноградова А.А., Коваленко П.П., Недоцук Г.А., Urbanski Michael. Бесконтактный способ измерения геометрических размеров тел // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – № 48.
11. Жуков Е.М., Алдушина М.А., Минаев А.И. Бесконтактный проекционный контроль геометрических параметров изделий и его реализация // Технические науки – от теории к практике. – 2016. – № 5-1 (53).
12. Лимонов А.Н.. Гаврилова Л.А. Прикладная фотограмметрия: учебник для вузов. – М.: Академический проект, 2016. – 256 с. – ISBN 978-5-8291-1919-5. – EDN YSKGKL.
13. Краснопевцев Б.В. Фотограмметрия: учебное пособие. – М.: УПП "Репография" МИИГАиК, 2008. – 160 с.
14. Хабарова И.А., Валиев Д.С., Чугунов В.А., Хабаров Д.А. Современная цифровая фотограмметрия // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». – 2019. – № 4-2.

## Секция VI

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В АСТРОФИЗИКЕ, ГЕОФИЗИКЕ И ИНЖЕНЕРНЫХ НАУКАХ

DOI: 10.18522/syssyn-2022-51

## Математическая модель управляемого роста опухолевых клеток

Душин Сергей Евгеньевич  
Санкт-Петербургский  
государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
Санкт-Петербург, Россия  
*dushins@yandex.ru*

Шпаковская Ирина Игоревна  
Санкт-Петербургский  
государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
Санкт-Петербург, Россия  
*iishpakovskaya@stud.etu.ru*

Графина Ольга Альбертовна  
Санкт-Петербургский  
государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
Санкт-Петербург, Россия  
*grafina3@gmail.com*

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию роста раковых клеток в человеческом организме на основе математической модели Решиньо и Де Лизи. Изучаются особенности патологических состояний равновесия, анализируется естественное развитие опухоли на фазовой плоскости. Рассматривается возможность управления процессами разрастания опухолевых клеток. Основной результат связан с установлением связи процедуры реструктуризации фазового портрета и обеспечением лучшего состояния онкологических больных.

**Annotation.** The article is devoted to the study of the growth of cancer cells in the human body based on the mathematical model of Reshinho and De Lisi. The features of pathological equilibrium states are studied, the natural development of the tumor on the phase plane is analyzed. The possibility of controlling the processes of tumor cell proliferation is being considered. The main result is associated with the establishment of a link between the procedure of restructuring the phase portrait and ensuring the best condition of cancer patients.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, раковая опухоль, солидная опухоль, иммунотерапия, патологическое состояние равновесия, управляемый процесс.

**Keywords:** mathematical modeling, cancer, solid tumor, computer model, immunotherapy, pathological state of equilibrium, managed process.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Иммунная система служит защитой нашего организма от вирусов, бактерий и иных патогенов. Однако главной задачей иммунитета является контроль за спонтан-

ными клеточными мутациями, чтобы не допустить появления злокачественных образований. Выделяют три этапа взаимодействия между опухолевыми и иммунными клетками во время зарождения опухоли:

- элиминация или иммунный надзор;
- равновесие или «спящий рак»;
- уклонение или прогрессия опухоли.

Во время первого этапа активно работающая иммунная система распознает и уничтожает опухолевые клетки, но некоторые клетки выживают и происходит переход на следующий этап, который характеризуется генетической нестабильностью и увеличением числа мутаций опухолевых клеток, а также размножением тех клеток, которые научились избегать иммунного надзора. После чего происходит переход на третий этап, где опухоль прогрессирует за счет клеточной пролиферации, способна подавлять иммунную систему и уклоняться от её воздействия. Математические модели (ММ), учитывающие взаимодействие иммунной системы с опухолевыми клетками, в настоящее время представляют большой интерес для развития биомедицинской науки.

При построении ММ поведения плотных раковых опухолей, рекомендуется руководствоваться определенными правилами [1].

1. Возникновение сбоя в механизме поддержания баланса гибнущих и рождающихся клеток приводит к их нерегулируемому (бесконтрольному) делению, что способствует появлению раковой опухоли, с которой иммунная система может не справиться. Однако существ-

вующие эффективные методы лечения способствуют тому, что регулирование может восстановиться и раковая опухоль исчезнет.

2. Плотная раковая опухоль развивается из так называемого инфламаторного инфильтрата, т. е. плотного воспалительного «желвака». Хотя воспалительный процесс и представляет собой часть регуляторно-защитных механизмов, но перейдя определенный порог, воспаление может оказаться опасным для организма, что нашло экспериментальное подтверждение.

3. Воспалительный процесс описывается количественно, если удается измерить (оценить) концентрацию клеток, т.е. число клеток в единице объема ткани. Получение ММ базируется на следующих допущениях:

- оба состояния ткани, как «нормальное», так и «раковое», являются сравнительно «устойчивыми» (асимптотически устойчивыми);
- регулирование процессом деления клеток и их за-программированной смертью осуществляется биохимически в результате «доставки» к клеткам определенных сигнальных молекул. Это не всегда корректно для опухолей с развитой системой кровеносных сосудов;
- любая клетка ткани развивается либо по пути «нормального» деления, либо неограниченного (бесконтрольного) роста.

4. Существует такая «критическая» концентрация клеток, при превышении которой регуляторная система организма не способна удерживать баланс между делением и гибеллю клеток. Только изменив концентрацию клеток за счет того или иного метода терапии или «сдвинув» критическую точку, можно избежать нерегулируемого деления и образования раковой опухоли.

5. Прием лекарственных средств и изменение во времени их концентраций в тканевом пространстве неотъемлемо связано с ростом опухолей. Разрабатываемая адекватная модель должна учитывать это обстоятельство, чего не делают различные фармакокинетические и фармакодинамические модели в силу своей специфики.

Все эти правила на сегодняшний день достаточно серьезно обоснованы, причем авторам [1] не удалось обнаружить ни одного экспериментально подтвержденного факта, вступающего с ними в противоречие в пределах принятых допущений.

## II. АНАЛИЗ МОДЕЛИ РОСТА ОПУХОЛИ

### A. Математическая модель роста опухоли

Учитывая вышесказанное, для исследования была выбрана модель Решиньо и Де Лизи [2]. Эта модель описывает динамику солидной опухоли в присутствие популяции лимфоцитов, которая стимулируется опухолью и антагонистична ей. Подобная модель подходит для описания видов рака, в которых часто диагностируются солидные опухоли: рак молочной железы, легких, предстательной железы, желудочно-кишечного тракта. При построении модели делаются следующие предположения.

- Опухоль имеет неизменную шарообразную форму, причем можно выделить внешнюю поверхность и внутреннюю части.
- Лимфоциты имеют доступ лишь к той части свободной опухоли, которая находится в поверхностной части.
- Популяция лимфоцитов ограничена максимальным значением.
- Количество связанных (уничтоженных) клеток опухоли пропорционально числу свободных лимфоцитов и свободных опухолевых клеток на поверхности.

Динамическая модель опухоли характеризуется системой из двух нелинейных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = -\lambda_1 x + \alpha_1 \frac{xy^{\frac{2}{3}}(1-\frac{x}{x_c})}{1+x}, \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = \lambda_2 y - \alpha_2 \frac{xy^{\frac{2}{3}}}{1+x}. \quad (2)$$

Параметры данной модели можно трактовать следующим образом:

- $\lambda_1$  – параметр, характеризующий естественную убыль лимфоцитов в отсутствие опухоли;
- $\lambda_2$  – параметр, характеризующий естественный рост опухолевых клеток в отсутствие лимфоцитов;
- $\alpha_1$  – параметр, характеризующий рост и поддержание количества лимфоцитов;
- $\alpha_2$  – параметр, характеризующий интенсивность воздействия лимфоцитов на опухоль;
- $x$  – количество лимфоцитов;
- $y$  – количество опухолевых клеток;
- $x_c$  – предельная численность лимфоцитов.

### B. Определение состояний равновесия

Вводятся следующие обозначения:

$$\psi(x; x_c) = x^2(1 - x/x_c)/(1 + x)^3, \quad (3)$$

$$k_1 = \lambda_1 \lambda_2^2 / (\alpha_1 \alpha_2^2). \quad (4)$$

С учетом обозначений состояния равновесия следует искать из выражения:

$$\psi(x; x_c)_{x=x_e} = k_1,$$

где  $x_e$  – точка равновесия.

Возрастая от нуля, функция (3) достигает максимума, а потом убывает, проходя через нуль, асимптотически приближаясь к -1. Установлено, что экстремальная точка характеризуется координатами:

$$\left( \frac{2x_c}{x_c + 3}, \frac{4}{27} \frac{x_c^2}{(x_c + 1)^2} \right),$$

а точка прохождения функции через ноль имеет координаты  $(x_c, 0)$ .

Функция  $\psi$  всегда имеет такой вид при положительных значениях параметра  $x_c$ , причем

$$x_c > 2x_c/(x_c + 3).$$

Это означает, что величина  $x_c$  всегда располагается правее точки максимума функции. Для определенности принимается значение  $x_c$  равным 10.

Для функции  $\psi(x; x_c)$  характерны три различные ситуации (о предопухолевом состоянии будет говориться отдельно):

1. Система не имеет патологических состояний равновесия. Для этого должно выполняться условие:

$$\frac{4}{27} \frac{x_c^2}{(x_c + 1)^2} < k_1.$$

График для этой ситуации приведен на рис. 1.

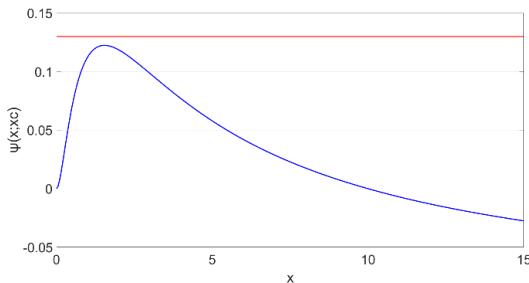


Рис. 1. График при отсутствии состояний равновесия

2. Система имеет одно патологическое состояние равновесия, достигаемое в точке максимума функции  $\psi(x; x_c)$ . Для этого должно выполняться условие:

$$\frac{4}{27} \frac{x_c^2}{(x_c + 1)^2} = k_1.$$

Точка равновесия задается координатами фазового пространства:

$$\left( \frac{2x_c}{x_c + 3}, \frac{4}{27} \frac{x_c^2}{(x_c + 1)^2} \right).$$

График для этой ситуации представлен на рис. 2.

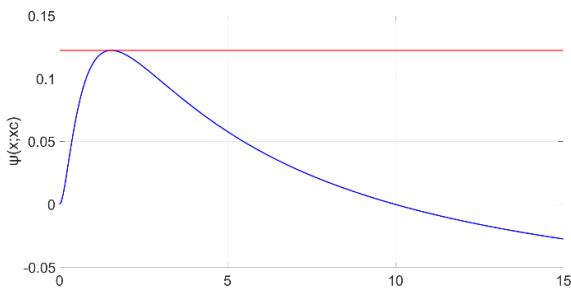


Рис. 2. График при единственном состоянии равновесия

Это состояние равновесия является крайне чувствительным к изменению параметров системы (параметр  $k_1$ ).

3. Система имеет два патологических состояния равновесия. При этом одно из них должно быть устойчивым. Для этого должно выполняться условие:

$$\frac{4}{27} \frac{x_c^2}{(x_c + 1)^2} > k_1.$$

График для этой ситуации представлен на рис. 3.

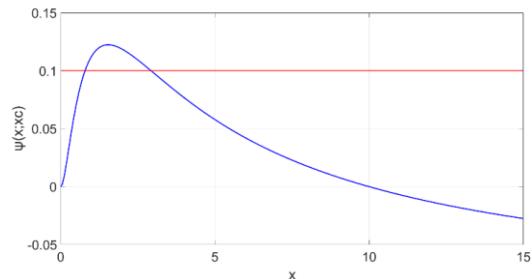


Рис. 3. График при двух состояниях равновесия

### C. Предопухолевое состояние равновесия

Пусть рассматривается предопухолевое (нулевое) состояние равновесия  $(0,0)$ , которое существует при любых значениях параметров модели. Структурный анализ показывает, что в этом случае система разбивается на две независимые подсистемы, одна из которых устойчивая, а другая неустойчивая. Это указывает на то, что даже при ничтожном количестве клеток опухоли во второй подсистеме начинается их рост с интенсивностью, определяемой параметром  $\lambda_2$ .

Моделирование производится для двух организмов (систем) со сравнительными параметрами  $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 1, \alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1$  и  $x_c = 50$  (рис. 4) либо  $x_c = 100$  (рис. 5). Первому организму соответствует малый уровень выработки предельного количества лимфоцитов, второму – большой уровень. В таких системах наблюдается неограниченный рост опухоли вне зависимости от начального состояния количества опухолевых клеток и лимфоцитов. Рано или поздно популяция лимфоцитов достигает предела численности, а число опухолевых клеток продолжает увеличиваться беспрепятственно.

Сравнительный анализ фазовых портретов и процессов демонстрирует, что увеличение параметра  $x_c$ , характеризующего верхнюю границу популяции лимфоцитов, не вносит в систему дополнительного состояния равновесия и не меняет характера ее динамики и времени роста опухоли.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что увеличение предела численности лимфоцитов не сможет остановить рост опухоли при любых начальных состояниях клеток опухоли и популяции лимфоцитов. Такую ситуацию можно трактовать как недостаточную эффективность лимфоцитов по уничтожению опухолевых клеток.

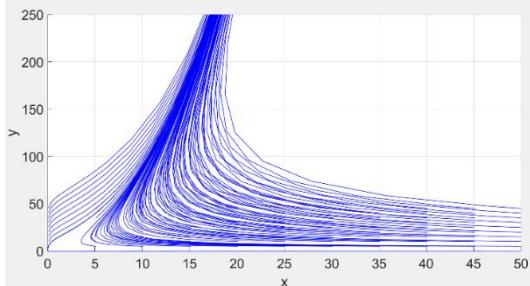


Рис. 4. Фазовый портрет для нулевого состояния равновесия

$$\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 1, \alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1, x_c = 50$$

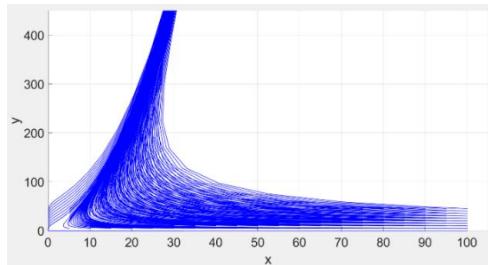


Рис. 5. Фазовый портрет для нулевого состояния равновесия  
 $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 1, \alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1, x_c = 100$

#### D. Единственное патологическое состояние равновесия

В ситуации одного состояния равновесия наблюдаются устойчивый и неустойчивый случаи. Фазовый портрет для устойчивого случая приведен на рис. 6. Из графиков следует, что развитие опухоли зависит от начальных условий, причем для остановки процесса роста необходимо определенное соотношение начального количества лимфоцитов и опухолевых клеток. Недостаточное количество лимфоцитов приводит к неконтролируемому росту опухоли. Но также и избыточное количество лимфоцитов может привести к отсутствию стимуляции их увеличения и, как следствие, к сокращению популяции лимфоцитов до значения, при котором рост опухоли перестает сдерживаться лимфоцитами.

Фазовый портрет для неустойчивого случая приведен на рис. 7. В этом случае параметр, отвечающий за естественный рост опухолевых клеток больше, чем создает неблагоприятную обстановку для излечения несмотря на то, что параметр, отвечающий за естественную смертность лимфоцитов, уменьшен. В такой ситуации рекомендуется применение терапии, которая могла бы снизить уровень популяции опухолевых клеток.

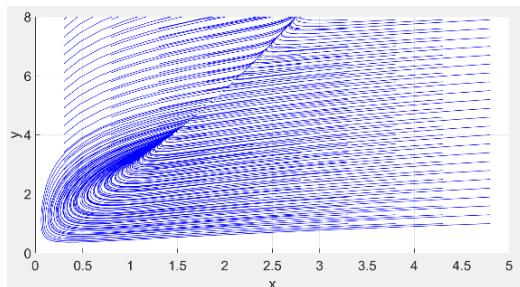


Рис. 6. Единственное внутреннее состояние равновесия:  
 устойчивый случай  
 $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0.3774, \alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1, x_c = 50$

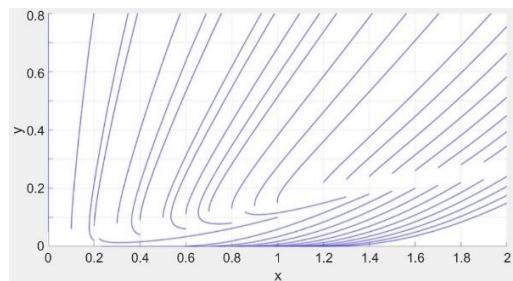


Рис. 7. Единственное внутреннее состояние равновесия:  
 неустойчивый случай  
 $\lambda_1 = 0.1424, \lambda_2 = 1, \alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1, x_c = 50$

#### E. Два патологических состояния равновесия

В случае двух состояний равновесия особая точка, отвечающая состоянию равновесия, расположенному слева от экстремальной, может являться устойчивым и неустойчивым фокусом или узлом в зависимости от соотношения параметров. Неустойчивое состояние к устойчивому можно привести, увеличивая параметры смертности лимфоцитов и стимуляции роста лимфоцитов. Также можно увеличивать интенсивность воздействия лимфоцитов на опухоль. Регулируя эти параметры, моделируется воздействие адоптивной клеточной терапии, осуществляющейся путем переливания особых лимфоцитов — одной из стратегий иммунотерапии, направленной на взаимодействие клеток и позволяющей распознавать клеткам иммунитета клетки опухоли. Фазовые портреты для различных типов особых точек приведены на рис. 8–11.

При неустойчивом фокусе (рис. 8) поведение системы зависит от начальных условий. Для определенного соотношения лимфоцитов и опухолевых клеток наблюдается периодичность спадов и подъемов популяции лимфоцитов с непрерывным ростом опухолевых клеток. Это можно трактовать как попытки иммунной системы противостоять вредному воздействию, но с недостаточной силой. При недостаточном количестве лимфоцитов возможен почти монотонный рост клеток опухоли, что свидетельствует о том, что опухолевых клеток уже слишком много, чтобы организм самостоятельно мог справиться. При одинаково малом количестве лимфоцитов и опухолевых клеток наблюдается затянутый процесс возле начала координат.

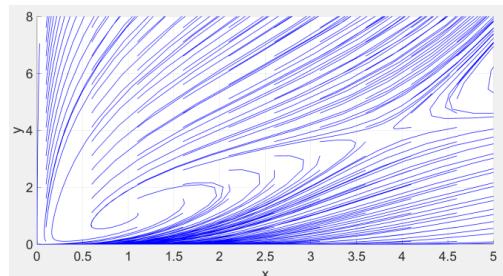


Рис. 8. Неустойчивый фокус и седло  
 $\lambda_1 = 0.48, \lambda_2 = 1.4, \alpha_1 = 1, \alpha_2 = 2.8, x_c = 50$

Поведение в случае неустойчивого узла (рис. 9) отличается от системы с неустойчивым фокусом. Параметры в этой системе благоприятны для излечения: параметры, отвечающие за естественную смертность лимфоцитов и естественный рост опухолевых клеток, уменьшились, что приводит к переходу опухоли в «спящее» состояние.

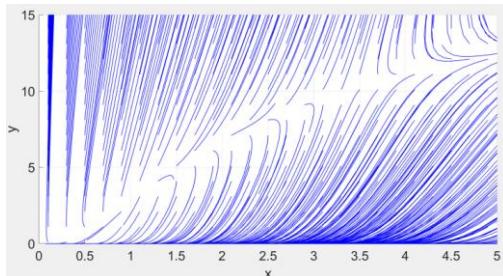


Рис. 9. Неустойчивый узел и седло  
 $\lambda_1 = 0.1, \lambda_2 = 1, \alpha_1 = 0.1, \alpha_2 = 2.8, x_c = 50$

При наличии устойчивого узла (рис. 10) исход взаимодействия опухоли с иммунной системой во многом зависит от начального количества опухолевых клеток. Если количество опухолевых клеток больше некоторого значения, то в любом случае рост опухоли станет неограниченным. Если опухолевых клеток меньше определенного количества, то лимфоцитов должно быть достаточно, чтобы остановить процесс роста опухоли. Кроме этого, велика вероятность «скрытого» развития опухоли.

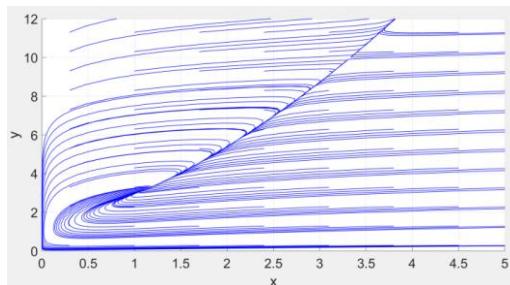


Рис. 10. Устойчивый узел и седло  
 $\lambda_1 = 4, \lambda_2 = 1, \alpha_1 = 4, \alpha_2 = 2.8, x_c = 50$

Такое же поведение демонстрирует система в случае устойчивого фокуса (рис. 11). Система с устойчивым фокусом отличается от системы с устойчивым узлом лишь только колебательным характером стремления к состоянию равновесия.

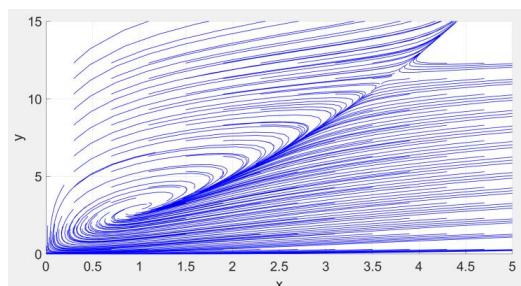


Рис. 11. Устойчивый фокус и седло  
 $\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.35, \alpha_1 = 0.5, \alpha_2 = 1, x_c = 50$

#### F. Управление поведением

Пусть рассматривается влияние управляющего параметра  $k_1$ . Согласно (4),  $k_1$  определяется соотношением параметров, причем  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  присущи организму и не могут управляемы извне, в то время как  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  представляют стимуляцию роста лимфоцитов и разрушаемость клеток опухоли лимфоцитами соответственно. Управляя последними параметрами, моделируется воздействие иммунотерапии, допускающее приведение системы к патологическому устойчивому состоянию равновесия. Бифуркацию типов особых точек можно отсчитывать от критической ситуации, когда имеется ровно одно внутреннее состояние равновесия. Это пограничное состояние: чуть выведя из него организм, можно добиться либо естественного роста, либо управляемого прекращения роста опухоли. Несмотря на наличие многообразия возможной динамики поведения системы, можно сделать некоторые обобщения по модели в целом.

Во-первых, данная модель демонстрирует, что при наличии достаточного избытка опухолевых клеток опухоль будет неограниченно расти, и никакая иммунная система не в силах самостоятельно справиться с разросшейся опухолью.

Во-вторых, возможность подавления роста опухоли иммунной системой проявляется в определенных пропорциях лимфоцитов и опухолевых клеток, и даже малый размер опухоли может привести к неконтролируемому ее росту в дальнейшем.

В-третьих, модель приобретает лучшие терапевтические свойства не повышением числа лимфоцитов (увеличением верхней границы популяции  $x_c$  или снижением темпа смертности  $\lambda_1$ ), а возрастанием скорости взаимодействия с клетками опухоли (увеличение параметров стимуляции  $\alpha_1$  и эффективности уничтожения  $\alpha_2$ ).

Случаи с устойчивой внутренней точкой равновесия показывают, что прекращение процесса роста опухоли будет достигнуто лишь при благоприятном начальном соотношении количества свободных лимфоцитов и опухолевых клеток. Также в этих случаях наблюдается процесс «скрытого» роста опухоли, когда опухоль «дремлет» до тех пор, пока популяция лимфоцитов не сократится. В таких случаях, возможно, следует проводить искусственное поддержание популяции лимфоцитов, чтобы опухоль не переходила в фазу неограниченного роста.

Случаи с неустойчивой точкой равновесия говорят нам о неограниченном росте опухоли в любом случае, но не стоит забывать о наличии затянутых процессов в области нулевого состояния равновесия, где возможно не полное устранение опухоли, а затягивание ее развития тем же способом, что и в случае «скрытой» опухоли, что следует учитывать при неоперабельных случаях.

Случаи с устойчивой и неустойчивой внутренней точкой равновесия можно рассматривать как модели двух различных типов иммунитета: в одном большая смертность лимфоцитов и малый рост опухоли, в другом небольшая смертность лимфоцитов и быстрый рост опухоли. Отсюда следует, что скорость роста опухоли играет более важную роль, чем естественная смертность лимфоцитов.

К тем результатам анализа, когда получаются длительные по времени процессы, следует относиться с особой осторожностью ввиду того, что известно такое явление, как подавление иммунной реакции организма при длительном присутствии опухолевых клеток.

#### G. Случай из клинической практики

Предлагается получить управляемую динамику развития солидной опухоли, опираясь на клинические данные. Управляющими воздействиями являются  $u_1 = \alpha_1, u_2 = \alpha_2$ . В качестве примера можно взять мужчину среднего возраста с раком легкого. Согласно [3], апоптоз лимфоцитов у здорового человека составляет в среднем 3%. Соответственно, параметр  $\lambda_1$ , отвечающий за естественную убыль лимфоцитов в отсутствие опухоли, принимается равным 0,03. Скорость роста опухолей в среднем составляет 12%, поэтому параметр  $\lambda_2$ , характеризующий естественный рост опухолевых клеток в отсутствие лимфоцитов, допускается равным 0,12 [4]. Среднее количество лимфоцитов составляет 4000 единиц. Для рака легкого у 5 из 11 наблюдалась стабилизация роста опухоли при применении адоптивной клеточной терапии, у еще двоих наблюдался частичный ответ [5]. Тогда вероятность успеха можно принять за 63% с учетом больных с частичным ответом, поэтому управ-

ляющее воздействие  $u_2$  будет равно 0,63. Стимуляция роста опухоли не является прямой целью в данном случае, поэтому управляющее воздействие  $u_1$  принимается за 0,1.

Фазовый портрет такой системы приведен на рис. 12, временные процессы – на рис. 13-15. За единицу измерения времени принимаются сутки. Точкой равновесия является устойчивый фокус. В качестве начальных условий выбираются  $x_0 = 2000$ ,  $y_0 = 10$ , характеризующие начальную стадию роста раковой опухоли. Видно, что за счет иммунотерапии удалось замедлить рост опухоли и она перешла в «спящий рак». Иммунная система не различает раковую опухоль, и интенсивность выработки лимфоцитов снижается, что в дальнейшем приводит к рецидиву заболевания. В подобной ситуации рекомендуется применить комбинированное лечение: либо удаление опухоли с продолжающейся адоптивной клеточной терапией, либо стимуляция лимфоцитов.

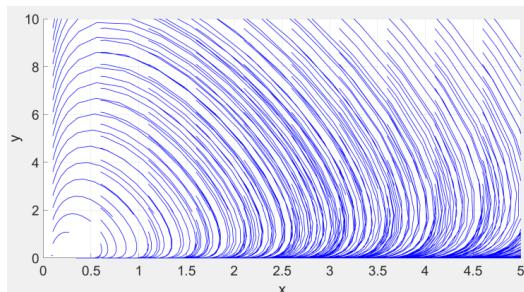


Рис. 12. Фазовый портрет

$$\lambda_1 = 0.03, \lambda_2 = 0.12, u_1 = 0.1, u_2 = 0.63, x_c = 4000$$

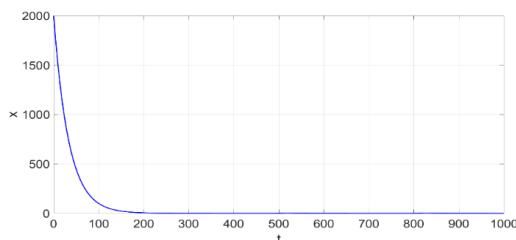


Рис. 13. Рост лимфоцитов  $x(t)$  при  $x_0 = 2000, y_0 = 10$

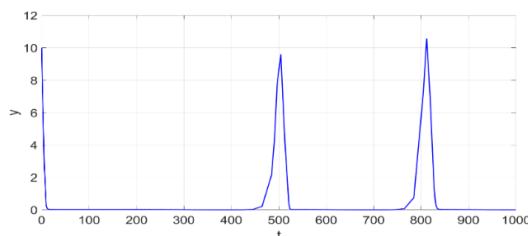


Рис. 14. Рост опухолевых клеток  $y(t)$  при  $x_0 = 2000, y_0 = 10$

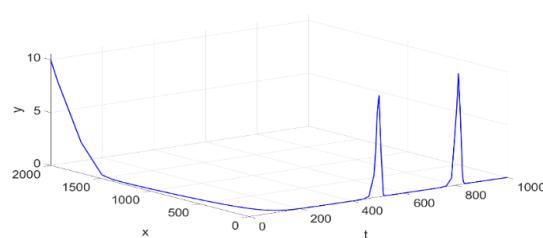


Рис. 15. Пространственная траектория  $(x, y, t)$  при  $x_0 = 2000, y_0 = 10$

Так как модель иллюстрирует процесс лишь «иммунного надзора», возможности для моделирования воздействия химиотерапии ограничены, поэтому имитируется воздействие стимуляции лимфоцитов [6] при изменении управляющего параметра  $u_1$  на 0,8.

Фазовый портрет системы приведен на рис. 16. Из графика видно, что точкой равновесия все еще является фокус, но точка равновесия смешена ниже относительно оси ординат  $y$ , что благоприятно характеризует лечение заболевания. Временные процессы в окрестностях первого рецидива приведены на рис. 17-19. Опухоль остается в устойчивом «спящем» состоянии, рецидивов не наблюдается.

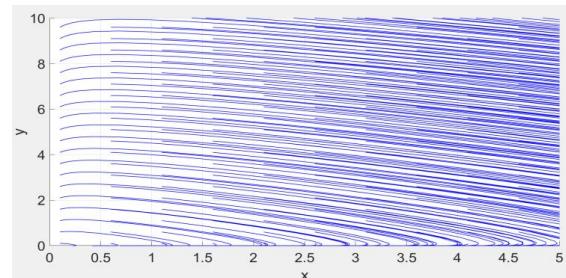


Рис. 16. Фазовый портрет

$$\lambda_1 = 0.03, \lambda_2 = 0.12, \alpha_1 = 0.8, \alpha_2 = 0.63, x_c = 4000$$

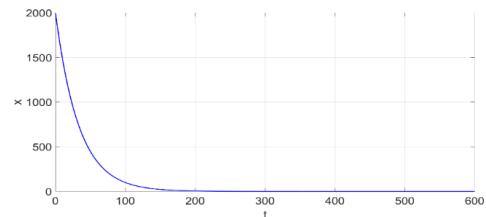


Рис. 17. Рост лимфоцитов  $x(t)$  при  $x_0 = 2000, y_0 = 10$

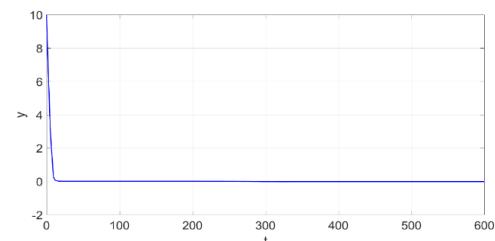


Рис. 18. Рост опухолевых клеток  $y(t)$  при  $x_0 = 2000, y_0 = 10$

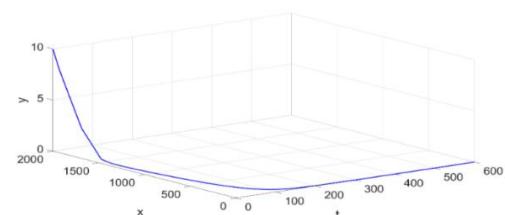


Рис. 19. Пространственная траектория  $(x, y, t)$  при  $x_0 = 2000, y_0 = 10$

В целом представленная управляемая динамика роста опухоли совпадает с ожидаемым результатом, что говорит о приемлемом характере воздействия иммунотерапии. Данное исследование, в отличие от работ [7–9], на-

правлено именно на детальное рассмотрение вопросов реструктурирования фазового портрета модели и может оказать существенную помощь при лечении онкологических больных.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлены случаи предопухолевого состояния организма, способного самостоятельно справиться с заболеванием.

2. Установлены благоприятные результаты протекания заболевания, которые в большей степени зависят от параметров, демонстрирующих взаимодействие лимфоцитов и опухолевых клеток, и на которые можно влиять.

3. Произведено управление динамикой роста опухолевых клеток на основе клинических данных, моделирующее воздействие адоптивной клеточной терапии и стимуляции роста лимфоцитов.

4. Совместное использование двух стратегий иммунотерапии показало более благоприятный результат, чем использование одной адоптивной клеточной терапии, что дает основание рекомендовать использование комбинированных схем лечения.

5. Полученные результаты в определенной мере раскрывают внутренние механизмы динамики опухолевых клеток и дают возможности прогнозирования их роста и воздействия терапии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Коптиог А.В., Мамонтов Е.В., Суховей Ю.Г. На пути к персонализированной медицине. Динамические модель развития опухоли // НАУКА из первых рук. – 2011, – № 6 (42). – С. 44-51.
2. Rescigno A, De Lisi C. Immune surveillance and neoplasia II // Bull. Math. Biol. – 1977. – 39. – С. 487-497.
3. Боровкова Н.В., Александрова И.В., Валетова В.В., Кобзева Е.Н. Апоптоз лимфоцитов крови в норме и при патологии // Молекулярная медицина. – 2013. – № 3. – С. 41-45.
4. Базанов К.В. Исследование скорости роста рецидивных и метастатических сарком мягких тканей // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 1227.
5. Киселевский М.В., Чикилева И.О., Ситникова С.М., Власенко Р.Я., Карапулов А.В. Перспективы применения генетически модифицированных лимфоцитов с химерным Т-клеточным рецептором (CAR-T-клеток) для терапии солидных опухолей // Иммунология. – 2019. – Т. 40, № 4. – С. 48-55.
6. Бязрова М.Г., Астахова Е.А., Спиридонова А.Б., Васильева Ю.В., Прилипов А.Г., Филатов А.В. Стимуляция В-лимфоцитов человека *in vitro* с помощью ИЛ-21/CD40L и их характеристика // Иммунология. – 2020. – Т. 41, № 6. – С. 501-510.
7. Сельвинский В.В. Моделирование динамики процесса развития опухоли // Вестник АмГУ. – 2020. – № 91. – С. 9-13.
8. Еремеева Н.И. Численное моделирование реакции иммунной системы на опухоль на основе уточненной модели Решиньо и Де Лизи // Вестник ЮУрГУ. – 2016. – Т. 9, № 2. – С. 103-109.
9. Еремеева Н.И. Обобщение модели Решиньо и Де Лизи реакции иммунной системы на случай множественных опухолей цилиндрической формы // Математическое моделирование. – 2016. – Т. 28, № 10. – С. 65-79.

# Применение методов математического моделирования в задачах атмосферной электродинамики

Белоусова Ольга Васильевна

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*obelousova@sedu.ru*

Клово Александр Георгиевич

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*agklovo@sedu.ru*

Куповых Геннадий Владимирович

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*kupovyh@sedu.ru*

Гривцов Владимир Владиславович

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*gvv@sedu*

**Аннотация.** Представлена математическая модель электродинамики атмосферного приземного слоя, обусловленная действием электродного эффекта вблизи поверхности земли. Проведен анализ системы уравнений методами теории подобия. Отдельно рассмотрены электродинамические модели приземного слоя в приближениях классического и турбулентного электродного эффекта. В математической постановке задач моделирования электродного слоя сделан ряд обоснованных физических допущений, расщепляющие уравнения по физическим процессам и позволившие получить аналитические решения. Получены формулы для расчетов профилей концентраций аэроионов, плотности объемного электрического заряда и напряженности электрического поля в электродном слое. В результате математического моделирования исследованы зависимости распределения электрических характеристик приземного слоя от значений электрического поля, степени ионизации воздуха и аэрозольного загрязнения атмосферы. Теоретические расчеты хорошо согласуются с известными экспериментальными данными и результатами численного моделирования электрической структуры приземного слоя. Полученные в работе аналитические формулы и результаты вычислений могут быть полезны при инженерных расчётах в ряде прикладных задач геофизики.

**Abstract.** A mathematical model of the atmospheric surface layer electrodynamics, due to the action of the electrode effect near the earth's surface, is presented. The system of equations is analyzed by methods of similarity theory. The surface layer electrodynamical models are considered separately in the classical and turbulent electrode effect approximations. In the mathematical formulation of the electrode layer modeling problems, a number of reasonable physical assumptions are made, splitting the equations into physical processes and making it possible to obtain analytical solutions. Formulas for calculating the air ions concentration profiles, the space electric charge density, and the electric field in the electrode layer are obtained. As a result of mathematical modeling, the dependences of the surface layer electrical char-

acteristics on the values of the electric field, the degree of air ionization and aerosol pollution of the atmosphere were studied. Theoretical calculations are in good agreement with the known experimental data and the results of the surface layer electrical structure numerical simulation. The analytical formulas obtained in the work and the results can be useful in engineering calculations in a number of applied geophysics problems.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, теория подобия, электродинамика, приземный слой, атмосфера, электродный эффект, электрическое поле, аэроионы, ионизация, аэрозоль.

**Keywords:** mathematical modeling, similarity theory, electrodynamics, surface layer, atmosphere, electrode effect, electric field, aeroions, ionization, aerosol.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Электрическое поле атмосферы определяется токовыми генераторами глобальным атмосферно-электрической цепи [1], а также локальным действием электродного эффекта [1, 2], в приземном слое. Структура формирующегося электродного слоя у поверхности земли зависит от значений атмосферного электрического поля, метеорологических условий, ионизации воздуха, степени аэрозольного и радиоактивного загрязнений. Известно много электродинамических моделей приземного слоя, основанных на теории электродного эффекта в атмосфере, имеются также результаты численных расчетов [2–7]. Для практики инженерных расчетов и оценок электрических характеристик атмосферы представляют интерес аналитические выражения, следующие из уравнений электродного эффекта с некоторыми обоснованными физическими допущениями.

## II. АНАЛИЗ УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРОДНОГО ЭФФЕКТА В АТМОСФЕРЕ

Основной задачей электродинамики приземного слоя атмосферы является нахождение пространственно-временных распределений его электрических характеристик: концентраций полярных аэроионов ( $n_{1,2}$ ), электрической проводимости ( $\lambda$ ) и электрического поля ( $E$ ), а также плотности объемного заряда ( $\rho$ ), плотности электрического тока ( $j$ ) и т.д.

Рассмотрим модель свободного от аэрозоля электродного слоя, которая состоит из ионизационно-рекомбинационных уравнений для нахождения распределения аэроионов и уравнения Пуассона для электрического поля [5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} & \pm \frac{\partial}{\partial z} (b_{1,2} \cdot n_{1,2} E) - \frac{\partial}{\partial z} (D_T(z) \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z}) = \\ & = q - \alpha n_1 n_2, \\ \frac{\partial E}{\partial z} & = \frac{e}{\epsilon_0} (n_1 - n_2) \end{aligned} \quad (1)$$

где  $b_{1,2}$  – подвижности положительных и отрицательных аэроионов,  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации,  $D_T = D_1 z$  – коэффициент турбулентной диффузии,  $q$  – скорость ионизации воздуха,  $e$  – элементарный заряд,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная.

Для исследования математической модели (1) используем методы теории подобия. Вначале обозразмерим уравнения, используя характерные значения и масштабы входящих в них физических величин:

$$\begin{aligned} t' &= t/T, \quad z' = z/l_1, \quad n'_{1,2} = n_{1,2}/n_\infty, \quad E' = E/E_\infty, \\ n_\infty &= \sqrt{q_\infty/\alpha}, \quad l_1 = D_1 \cdot \tau, \quad \tau = (q_\infty \alpha)^{-1/2} \end{aligned} \quad (2)$$

Знак «» означает верхнюю границу электродного слоя. Получаем систему в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \frac{\tau}{T} \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial t'} & \pm \frac{\partial}{\partial z'} \left( z' \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} \right) \pm \xi_{1,2} \frac{\partial}{\partial z'} (n'_{1,2} E') = \\ & = \frac{q}{q_\infty} - n'_1 n'_2, \\ \frac{\partial E}{\partial z'} & = \gamma (n'_1 - n'_2). \end{aligned} \quad (3)$$

Характерное время протекания метеорологических процессов в атмосфере  $T \sim 1-3$  ч, тогда как время релаксации для аэроиона –  $\tau = 300$  с ( $q_\infty = 10^7 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$  и  $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3\text{с}^{-1}$ ). Поэтому далее будем рассматривать стационарные модели. Систему (3) характеризуют два безразмерных параметра, являющимися критериями подобия:

$$\xi_{1,2} = \frac{|b_{1,2}| \cdot E_\infty \cdot \tau}{l_1}, \quad \gamma = \frac{e}{\epsilon_0} \frac{n_\infty}{E_\infty} l_1. \quad (4)$$

Из анализа уравнений (3) следует, что при значениях параметра  $\xi_{1,2} \geq 1$  имеет место модель классического электродного эффекта [2, 3], когда атмосфера неподвижна и распределение аэроионов (и электрической проводимости) обусловлено только электрическим полем. Если параметр  $\xi_{1,2} < 1$ , имеет место турбулентный электродный эффект: перенос аэроионов в атмосфере осуществляется, наряду с электрическими силами, турбулентными потоками воздуха [2, 4]. При  $\xi_{1,2} < 1$ , имеет место приближение сильного турбулентного перемешивания, когда турбулентная диффузия играет основную роль в переносе аэроионов [2]. Если предположить  $|\gamma| \ll 1$ , тогда напряженность электрического поля можно считать постоянной.

## III. МОДЕЛЬ КЛАССИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОДНОГО СЛОЯ В ЧИСТОЙ АТМОСФЕРЕ

Как следует из теории электродного эффекта (при условии  $\xi_{1,2} \geq 1$ ) профиль концентрации положительных ионов проводимости практически не зависит от высоты ( $n_1 \approx const$ ) [2, 3]. Для получения аналитических решений сделаем следующие физические допущения:  $E = E_0 = const$ ,  $q = const$ . Тогда, уравнение для отрицательных аэроионов с соответствующим граничным условием принимает вид:

$$-b_2 E_0 \frac{dn_2}{dz} = q - \alpha n_1 n_2, \quad (5)$$

$$n_2(z=0) = 0.$$

Решением (5) является следующее выражение для высотного профиля отрицательных аэроионов:

$$n_2(z) = \frac{q}{\alpha n_1} \cdot \left( 1 - \exp\left(\frac{\alpha n_1 z}{b_2 E_0}\right) \right). \quad (6)$$

Тогда плотность электрического заряда может быть рассчитана по формуле:

$$\rho(z) = e(n_1(z) - n_2(z)). \quad (7)$$

В результате получаем:

$$\rho(z) = e \left( n_1 - \frac{q}{\alpha n_1} \cdot \left( 1 - \exp\left(\frac{\alpha n_1 z}{b_2 E_0}\right) \right) \right). \quad (8)$$

Для расчета напряжённости электрического поля воспользуемся теорией классического электродного эффекта [2, 3], а именно тем, что полный электрический ток ( $j_0$ ) равен току проводимости и его плотность не меняется по высоте. По закону Ома на верхней границе электродного слоя имеем:

$$\begin{aligned} j_0 &= \lambda_\infty \cdot E_0, \\ \lambda_\infty &= e(b_1 n_1(\infty) + b_2 n_2(\infty)), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $n_{1,2}(\infty) = (q/\alpha)^{1/2}$  – асимптотические значения концентраций аэроионов на верхней границе электродного слоя.

Тогда для расчета профиля напряженности электрического поля имеем формулу:

$$\begin{aligned} E(z) &= j_0 / \lambda(z), \\ \lambda(z) &= e(b_1 n_1(z) + b_2 n_2(z)), \end{aligned} \quad (10)$$

Для расчётов параметры модели задавались следующими:  $b_{1,2} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$ ,  $q = 10^7 \text{ м}^{-3} \text{с}^{-1}$ ,  $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \text{с}^{-1}$ . Во всех случаях электродный эффект (отношение значений напряжённости электрического поля на поверхности земли и на верхней границе электродного слоя) практически одинаков, что согласуется с численными моделями [2, 3]. Усиление электрического поля приводит к уменьшению толщины электродного слоя, масштабов распределения и, следовательно, значений напряжённости поля и плотности объемного заряда. Увеличение скорости ионизации воздуха также уменьшает толщину электродного слоя, но при этом увеличиваются значения плотности электрического заряда.

#### IV. МОДЕЛЬ КЛАССИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОДНОГО СЛОЯ В УСЛОВИЯХ АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Предположим, что приземный слой заполнен однократно заряженными монодисперсными аэрозольными частицами. Тогда в правых частях ионизационно-рекомбинационных уравнений, можно добавить член, описывающий взаимодействие аэроионов с аэрозолем в виде  $BNn_{1,2}$  [2, 6]. Здесь  $B = \frac{2\eta_1\eta_2}{\eta_1 + 2\eta_2}$  – параметр, зависящий от коэффициентов взаимодействия легких ионов, нейтральных и заряженных аэрозольных частиц,  $N$  – полная концентрация аэрозольных частиц,  $\eta_{1,2}$  – коэффициенты воссоединения полярных аэроионов с аэрозольными частицами ( $\eta_1 = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \text{с}^{-1}$ ,  $\eta_2 = 4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \text{с}^{-1}$ ). Очевидно, что для концентраций аэрозольных частиц сопоставимых или превышающих значения для аэроионов рекомбинацией можно пренебречь [2, 6].

Тогда с учетом сделанных выше допущений, имеем уравнение для отрицательных аэроионов с соответствующим граничным условием:

$$\begin{aligned} -b_2 E_0 \frac{dn_2}{dz} &= q - BNn_2, \\ n_2(z=0) &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Решением (11) является следующее выражение:

$$n_2(z) = \frac{q}{BN} \left( 1 - \exp \left( \frac{BN}{b_2 E_0} z \right) \right). \quad (12)$$

Профиль плотности электрического заряда может по формуле (7) равен:

$$\rho(z) = e \left( n_1 - \frac{q}{BN} \left( 1 - \exp \left( \frac{BN}{b_2 E_0} z \right) \right) \right). \quad (13)$$

Для расчета профиля напряжённости электрического поля воспользуемся формулами (9) и (10) с учетом того, что асимптотические значения концентраций аэроионов на верхней границе электродного слоя в условиях аэрозольного загрязнения изменяются и принимают значения:  $n_{1,2}(\infty) = q/(BN)$ .

Аэрозольное загрязнение воздуха ( $N \sim 10^{10} - 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ) приводит к уменьшению высоты классического электродного слоя и значений плотности электрического заряда в нем. Увеличение степени ионизации, как и усиление электрического поля, приводит к увеличению плотности объемного заряда вблизи поверхности земли, но в меньшей степени, чем в чистой атмосфере. Масштаб распределения напряжённости электрического поля уменьшается с увеличением концентрации частиц.

#### V. МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОГО ЭЛЕКТРОДНОГО СЛОЯ В ЧИСТОЙ АТМОСФЕРЕ

Для получения аналитического решения системы (1) положим постоянными параметры  $D_T(z,t) = D_0$ ,  $E = E_0$  и  $q$ . Далее используем идею расщепления по физическим процессам. Линеаризуем правые части ионизационно-рекомбинационных уравнений, положив в первом уравнении  $n_2 = n_\infty$ , а во втором –  $n_1 = n_\infty$ , и тогда получаем [4, 8]:

$$\pm b_{1,2} E_0 \frac{dn_{1,2}}{dz} - D_0 \frac{d^2 n_{1,2}}{dz^2} = q - \alpha n_\infty n_{1,2}. \quad (14)$$

Границные условия:

$$n_{1,2}(z=z_0) = 0, \quad n_{1,2}(z=z_\infty) = \sqrt{q_\infty / \alpha} = n_\infty, \quad (15)$$

где  $z_0$  – масштаб шероховатости земной поверхности.

На первом этапе получим аналитические решения для нахождения профилей полярных аэроионов.

$$\begin{aligned} n_1(z) &= \frac{q}{\alpha n_\infty} \left( 1 - e^{-k_{12}(z-z_0)} \right), \\ n_2(z) &= \frac{q}{\alpha n_\infty} \left( 1 - e^{-k_{22}(z-z_0)} \right) \end{aligned}, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} k_{12} &= \frac{b_1 E_0 - \sqrt{4D_0 \alpha n_\infty + (b_1 E_0)^2}}{2D_0}, \\ k_{22} &= \frac{-b_2 E_0 - \sqrt{4D_0 \alpha n_\infty + (b_2 E_0)^2}}{2D_0} \end{aligned}$$

Далее осуществим расчеты объемной плотности электрического заряда по формуле (5):

$$\rho(z) = \frac{eq}{\alpha n_\infty} \left( e^{k_{22}(z-z_0)} - e^{k_{12}(z-z_0)} \right). \quad (17)$$

Для расчёта профиля электрического поля  $E(z)$  перейдем к уравнению для стационарного полного тока, вытекающего из системы (1) [9, 10]. Значение полного тока можно рассчитать по формуле (9). С учётом сделанных выше допущений, а также полагая постоянным значение электрической проводимости, уравнение примет вид:

$$-\varepsilon_0 D_0 \frac{d^2 E}{dz^2} + \lambda E = j_0. \quad (18)$$

Границные условиями:

$$E(z \rightarrow \infty) = E_\infty, \quad E(z = z_0) = E_0 \quad (19)$$

Решением (18) и (19) является профиль электрического поля в турбулентном электродном слое:

$$E(z) = (E_0 - E_\infty) e^{-\frac{(z-z_0)}{\sqrt{\varepsilon_0 D_0}}} + E_\infty. \quad (20)$$

Значения напряжённости электрического поля на нижней и верхней границах турбулентного электродного слоя в (19) задаются такими же, как в случае классического электродного эффекта, полученными в результате модельных расчётов (при тех же параметрах).

В ходе вычислительных экспериментов получены следующие результаты. В условиях турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы высота электродного слоя увеличивается по сравнению с классическим случаем, а его электрическая структура зависит от степени турбулентного перемешивания ( $D_0 = 0,01 - 0,1 \text{ м}^2/\text{с}$ ). Знак объемного электрического заряда положителен, а максимальное значение его плотности наблюдается у поверхности земли.

## VI. МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОГО ЭЛЕКТРОДНОГО СЛОЯ В УСЛОВИЯХ АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Рассмотрим модель турбулентного электродного слоя, заполненный монодисперсными аэрозольными частицами. Тогда в правой части ионизационно-рекомбинационных уравнений, можно добавить член  $BNn_{1,2}$ , описывающий взаимодействие аэроионов с аэрозолем [4]. Очевидно, что для достаточно больших концентраций аэрозоля ( $N \geq n_{1,2}$ ) рекомбинационным членом в правых частях уравнений можно пренебречь.

Используя сделанные выше допущения ( $E = E_0 = \text{const}$ ,  $q = \text{const}$ ,  $D_T(z,t) = D_0 = \text{const}$ ), перейдем к следующей системе с соответствующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} -D_0 \frac{d^2 n_{1,2}}{dz^2} \pm b_{1,2} E_0 \frac{dn_{1,2}}{dz} &= q - BNn_{1,2}, \\ n_{1,2}(z = z_0) = 0, \quad n_{1,2}(z \rightarrow \infty) &= \frac{q}{BN}. \end{aligned} \quad (21)$$

Решением (21) являются профили концентраций поллярных аэроионов:

$$\begin{aligned} n_1(z) &= \frac{q}{BN} \left( 1 - e^{\mu_{12}(z-z_0)} \right), \\ n_2(z) &= \frac{q}{BN} \left( 1 - e^{\mu_{22}(z-z_0)} \right), \end{aligned} \quad (22)$$

где

$$\begin{aligned} \mu_{12} &= \frac{b_1 E_0 - \sqrt{4D_0 BN + (b_1 E_0)^2}}{2D_0}, \\ \mu_{22} &= \frac{-b_2 E_0 - \sqrt{4D_0 BN + (b_2 E_0)^2}}{2D_0}. \end{aligned}$$

Тогда для плотности объемного заряда получаем:

$$\rho(z) = \frac{eq}{BN} \left( e^{\mu_{22}(z-z_0)} - e^{\mu_{12}(z-z_0)} \right) \quad (23)$$

Расчет профиля напряженности электрического поля  $E(z)$  осуществляется по формуле (20) с учетом измененных значений электрической проводимости  $\lambda$  и  $\lambda_\infty$ , а следовательно и плотности тока  $j_0$ , за счет присутствия аэрозоля в атмосфере.

Как и в случае классического электродного эффекта, появление аэрозольных частиц ( $N \sim 10^{10} - 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ) в приземном воздухе приводит к уменьшению высоты турбулентного электродного слоя и значений плотности электрического заряда в нем.

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании теории подобия с использованием методов математического моделирования сделаны обоснованные физические допущения и построены аналитические модели классического и турбулентного электродного слоя в атмосфере. Получены выражения для профилей электрических характеристик приземного слоя в чистой атмосфере и при наличии в ней аэрозольных частиц. Показана зависимость распределений концентраций аэроионов, электрической проводимости, плотности объемного заряда и электрического поля от степени ионизации воздуха и его аэрозольного загрязнения.

Полученные аналитические решения хорошо согласуются с известными теоретическими и экспериментальными данными [2–4] и могут быть полезны при решении ряда прикладных задач геофизики, в частности для мониторинга состояния атмосферы [11, 12].

## ЛИТЕРАТУРА

- Морозов В.Н. Атмосферное электричество // Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – С. 394–408.
- Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере: монография. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 123 с.
- Куповых Г.В., Морозов В.Н. Классический (нетурбулентный) электродный эффект в приземном слое // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2003. – № 2. – С. 43–46.

4. Куповых Г.В., Морозов В.Н Турбулентный электродный эффект в приземном слое // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Приложение № 3. – 2003. – С. 55-62.
5. Свидельский С.С., Литвинова В.С., Куповых Г.В., Клово А.Г. Формирование структуры атмосферного электродного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 5. – С. 130-141.
6. Редин А.А., Клово А.Г., Куповых Г.В. Математическое моделирование электродинамической структуры приземного слоя атмосферы в условиях аэрозольного загрязнения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009, – № 7 (96). – С. 192.
7. Kupovych G., Redin A., Boldyreff A. Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer. // Journal of Electrostatics 71. Elsevier B.V. – 2013. – P. 305-311.
8. Kupovych G.V., Timoshenko D.V., Klovo A. G., Kudrinskaya T.V. Electrodynmaic processes models in atmospheric surface layer // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Vol. 698 (2019) 044034. – 8 p.
9. Аджиев А.Х., Клово А.Г., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Тимошенко Д.В. Суточные вариации электрического поля в приземном слое атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 57, № 4. – С. 452-461.
10. Белоусова О.В. Влияние турбулентного перемешивания и ионизации воздуха на структуру приземного электродного слоя атмосферы // Сборник трудов VIII Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности». – Таганрог, 2022. – С. 228-231.
11. Шулейкин В.Н., Щукин Г.Г., Куповых Г.В. Развитие методов и средств прикладной геофизики – атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов: монография. СПб.: РГГМУ, 2015. – 206 с.
12. Kupovych G.V., Kudrinskaya T.V., Grivtsov V.V. The atmosphere electrical characteristics' monitoring as an element of technosphere safety // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 913 (2020) 052041. – 6 p.

# О низкочастотных колебаниях звёздных изображений на 6-метровом телескопе БТА

**Тамаров Вячеслав Аркадьевич**  
Институт прикладной математики  
Томский государственный университет  
Томск, Россия  
*vat25@mail.ru*

**Таволжанская Алина Сергеевна**  
Физико-технический факультет  
Северо-Кавказский федеральный  
университет  
Ставрополь, Россия  
*tavolgalina@yandex.ru*

**Панчук Владимир Евгеньевич**  
Лаборатория астроспектроскопии  
Специальная астрофизическая  
обсерватория РАН  
п.Нижний Архыз, Россия  
*panchuk@ya.ru*

**Аннотация.** По данным работы локального корректора положения центра изображения звезды в фокусе Нэсмита 6-метрового телескопа БТА, обнаружена анизотропия колебаний и выделена составляющая, индуцированная переменной ветровой нагрузкой на трубу телескопа.

**Abstract.** According to the work of the local corrector of the position of the center of the star image in the Nasmyth focus of the 6-meter BTA telescope, anisotropy of oscillations was detected and a component induced by a variable wind load on the telescope tube is defined.

**Ключевые слова:** астроклимат, наклоны волнового фронта, спектр колебаний конструкции телескопа.

**Keywords:** astroclimate, the slopes of the wavefront, the spectrum of oscillations of the telescope structure.

## I. ВВЕДЕНИЕ

6-метровый телескоп БТА на момент начала наблюдений (1975) и до ввода в действие 10-метрового телескопа Keck (1991) являлся самым большим наземным оптическим телескопом, но, к сожалению, недостаточно оснащенным светоприемной аппаратурой [1]. Именно дефицит такой аппаратуры не позволял построить устойчивую систему объективного контроля астроклиматических данных. Кроме того, работы по астроклимату на уже установленном телескопе ошибочно рассматривались как второстепенные, отвлекающие коллектив от престижных астрофизических наблюдательных программ. После 1983 года публикация отчетов группы «Астроклимат» была прекращена. Накопление астроклиматических характеристик продолжалось отдельными группами астрономов-наблюдателей, с регистрацией в журналах наблюдений. Первый анализ объективных оценок качества изображений по наблюдениям на фокальном редукторе первичного фокуса БТА [2] опубликован в [3]. Кроме статистики диаметров звёздных изображений, на БТА накапливается информация о колебаниях таких изображений как целого. Сбор таких данных осуществляется при работе автоматических гидирующих устройств, увеличивающих проницающую способность спектрскопических наблюдений и облегчающих работу астронома-наблюдателя. Например, в фокусе Нэсмит-2 уже третий десяток лет используется локальный корректор (ЛКН) положения изображения звезды [4].

На БТА запланированы работы по увеличению проницающей способности спектропсии высокого разрешения методами адаптивной оптики [5]. Предполагается построить несколько контуров, один из которых будет отвечать за компенсацию крупномасштабных квазистатических aberrаций главного зеркала (ГЗ) телескопа, возникающих как вследствие изменения температуры ГЗ, так и в результате неидеальной работы системы разгрузок ГЗ при эволюциях телескопа (т.е., изменений азимута и зенитного расстояния). Другой контур будет отвечать за коррекцию общих наклонов излучения, приходящего от опорной звезды. Заключительный каскад адаптивной системы будет применяться для компенсации крупно- и мелкомасштабных aberrаций, вызванных атмосферными явлениями. В этом плане желательно провести анализ низкочастотных колебаний положения центра изображения звезды, регистрируемых при работе ЛКН.

## II. О ФЕНОМЕНЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

В работе [5] отмечено, что колебания положения изображения звезды в фокусе Нэсмита могут быть связаны как с наличием низкочастотных волн плотности в атмосфере, (см. работы [6, 7]), так и с наличием собственных колебаний телескопа, возбуждаемых при смене режимов работы (наведение, коррекция положения объекта, сопровождение). Действия таких низкочастотных волн проявлялись, когда при полном отсутствии ручной коррекции положения телескопа и приземного ветра наблюдалась квазипериодические («волновые») смещения изображения звезды до 3-4 угловых секунд. Влияние «телескопной» компоненты колебаний проявлялось при ручной коррекции режима программного сопровождения объекта. При минимальной скорости коррекции движения телескопа (0.2 угл.сек. в секунду), возникают колебания с амплитудой до 1 угл.сек., время затухания колебаний составляет 25 секунд. При увеличении скорости коррекции эффект усиливался и время затуханий превышало интервал между соседними необходимыми коррекциями. Доминирующие гармоники колебаний, измеренных на осях телескопа, находятся на частотах  $0.8 \pm 1$  Гц и 0.4 Гц для осей азимута A и зенитного расстояния Z, соответственно [8]. Третья компонента колебаний изображений определяется «парусно-

стью» конструкции верхней части трубы телескопа (кабина первичного фокуса (ПФ) и кольцо). При скорости приземного ветра более 4 м/сек, в юго-западных азимутах положения телескопа наблюдаются колебания, коррелирующие с изменениями скорости ветра, измеряемой на высоте средней части башни телескопа. В этом случае спектр собственных частот телескопа возбуждается не со стороны приводов осей А и Z (как при коррекции), а ветровыми нагрузками на верхнюю часть трубы. Итак, предположения о комплексном характере низкочастотных колебаний сделаны, остается подтвердить их экспериментально.

### III. Принцип работы ЛКН

Оптико-механическая часть локального корректора в фокусе Нэсмита (ЛКН, [4]) – плоско-параллельная пластина из плавленого кварца на подвесе Кардана – конструктивно не изменилась. За период эксплуатации ЛКН неоднократно усовершенствовались характеристики светоприемника (матриц ПЗС, работающих с телевизионной частотой), и программное обеспечение. Предельные углы наклона пластины позволяют корректировать положение звезды в интервале  $+/- 3$  угл.сек. от заданного центра изображения. Если рассогласования положения заданного центра от реального положения монотонно возрастают и выходят за границы, определяемые допустимыми наклонами пластины, система управления телескопом отрабатывает эти монотонные рассогласования и ЛКН продолжает компенсировать низкочастотные колебания. Сигналы компенсации рассогласований, выраженные в угловых секундах, накапливаются в ЭВМ системы управления. За одну секунду выполняется около четырех коррекций. Пример записи рассогласований по одной из координат (вертикальной, Y) подвеса пластины ЛКН приведен на рис. 1.

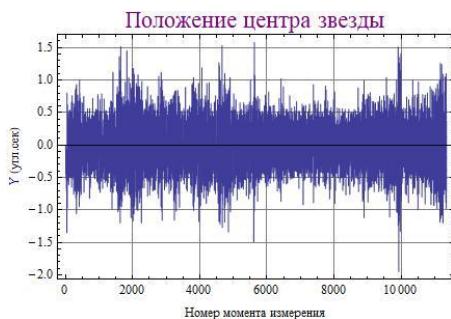


Рис. 1. Запись рассогласований между заданным положением звезды и реальным, вызываемым низкочастотными колебаниями. Составляющая смещений по вертикали (Y)

### IV. АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ

При работе ЛКН отсутствуют воздействия от системы ручной коррекции, но сохраняются два типа колебаний изображений: колебания телескопа, возбуждаемые ветровой нагрузкой на трубу, и колебания, вызванные гравитационными волнами, возникающими в атмосфере на границе раздела двух воздушных масс различной температуры и плотности [7]. Запись рассогласований представляет собой ряд равноотстоящих отсчетов, поэтому достаточно применить дискретное преобразование Фурье, ДПФ. Спектр мощности, соответствующий рис. 1, представлен на рис. 2.

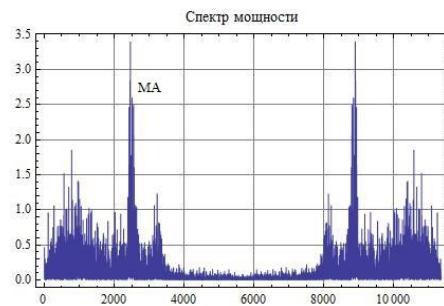


Рис. 2. Спектр мощности колебаний, приведенных на рис. 1

Подробный фрагмент спектра мощности в области максимальных амплитуд (обозначение МА на рис. 2) приведен на рис. 3.



Рис. 3. Фрагмент спектра мощности, приведенного на рис. 2

Положение центра изображения вычисляется по картинке, получаемой от телевизионного подсмотра, где центральная часть изображения звезды закрыта темным изображением входа в спектрограф. Поэтому положение центра изображения звезды вычисляется по слабой периферийной части этого изображения. Предположение о симметричной форме изображения звезды, попадающего в спектрограф, не работает на больших зенитных расстояниях ( $Z > 60^\circ$ ), где изображение вытянуто за счет эффекта атмосферной дисперсии. В этом случае астроном-наблюдатель при настройке ЛКН проецирует на вход спектрографа ту часть изображения, которая соответствует регистрируемому участку спектра (на спектрографе НЭС БТА [9] это участок протяженностью 300 нм). Размер входа в резатель изображений спектрографа составляет около  $2 \times 2$  угл.сек, поэтому далее, при анализе гармоник вводим свободный параметр – задаем минимальную амплитуду колебаний (в данном примере 1.5 угл.сек), выше которой будем определять периоды гармоник. Для 6 гармоник в интервале номеров 2425 – 2552 выделены периоды от 4.68 до 4.45 секунд. Анализ колебаний по другой (горизонтальной, X) координате ЛКН показал, что в интервале номеров 2390 – 2611 выделено 27 гармоник, с периодами от 4.68 до 4.35 секунд. Таким образом, показано, что в данной серии измерений спектры колебаний значимо различаются. Горизонтальная составляющая колебаний имеет более развитый набор гармоник. Заметим, что для выявления эффекта анизотропии колебаний телескопа, выбраны наблюдения, проводившиеся при скорости ветра  $v \sim 7$  м/сек, т.е., в условиях, близких к зоне запрета на работу БТА ( $v \geq 10$  м/сек). На рис. 4 приведен

пример колебаний при слабом ветре. Пик в начале записи, соответствующий процедуре захвата объекта (ЗО), при ДПФ не учитывался. Здесь также регистрируется анизотропия колебаний.

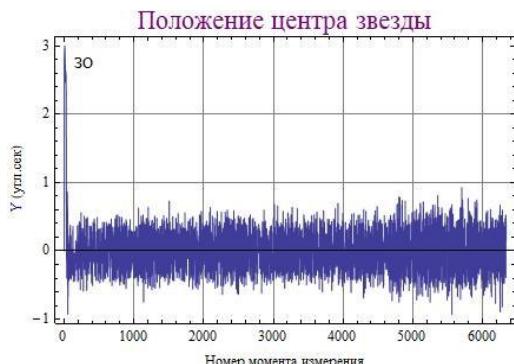


Рис. 4. Вертикальная составляющая колебаний центра изображения звезды, измеренная при слабом ветре (1-2 м/сек)

## V. ВЫВОДЫ

Как и корректирующие воздействия на АСУ БТА со стороны наблюдателя, ветровая нагрузка на трубу телескопа вызывает колебания на собственных частотах конструкции. Колебания ветровой природы анизотропны, чем отличаются от колебаний, возникающих на границе раздела слоев воздуха разной температуры. Применение локального корректора наклонов волнового фронта (ЛКН) компенсирует колебания изображения, обвязанные как инструментальным, так и атмосферным эффектам. В условиях эксплуатации БТА применение ЛКН обеспечивает выигрыши в спектроскопии высокого разрешения приблизительно на одну звездную величину. Точные оценки выигрыша зависят от конкретных

астроклиматических условий (качество турбулентных изображений и сила ветра). В схеме применения адаптивной оптики по центральной звезде, предварительная работа локального корректора снимет проблему коррекции низкочастотных наклонов волнового фронта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев В.Л. Развитие методов спектроскопии слабых объектов на 6-м телескопе // В кн. «Специальная астрофизическая обсерватория. 40 лет. Юбилейный сборник.». – Нижний Архыз, 2006. – С. 23-31.
2. Афанасьев В.Л., Мусеев А.В. Универсальный редуктор светосилы 6-м телескопа SCORPIO // Письма в Астрон. Журн. – 2005. – Т. 31, № 3. – С. 214-225.
3. Panchuk V.E. and Afanas'ev V.L. Astroclimate of Northern Caucasus - Myths and reality // Astrophysical Bulletin. – 2011. – Vol. 66, Iss. 2. – P. 233-254.
4. Иванов А.А., Панчук В.Е., Шергин В.С. Спектральный комплекс фокуса Нэсмита 6-м телескопа БТА. VIII. Локальный корректор положения звезды. // Препринт САО. – 2001. – № 155. – С. 1-19.
5. Klochkova V.G., Sheldakova Yu.V., Vlasyuk V.V., Kudryashov A.V. Improving the Efficiency of High-Resolution Spectroscopy on the 6-m Telescope Using Adaptive Optics Techniques // Astrophysical Bulletin. – 2020. – Vol. 75, Iss. 4. – P. 468-481.
6. Колчинский И.Г. Некоторые результаты наблюдений дрожания изображений звёзд на площадке ГАО АН УССР в Голосееве // Астрон. Журн. – 1957. – Т. 34, № 4. – С. 638-651.
7. Колчинский И.Г. Оптическая нестабильность земной атмосферы по наблюдениям звезд. – Киев, Наукова думка, 1967. – 181 с.
8. Снежко Л.И. Проект БТА: исследование, состояние и перспективы. 2006. – [https://www.sao.ru/hq/sekbta/40\\_SAO/Snezhko.htm](https://www.sao.ru/hq/sekbta/40_SAO/Snezhko.htm).
9. Панчук В.Е., Клочкива В.Г., Юшкин М.В. Эшелле спектрограф высокого разрешения 6-метрового телескопа БТА // Астрон. Журн. – 2017. – Т. 94, № 9. – С. 808-818.

# Моделирование воздействия на стохастический объект иммунологии

Колесникова Светлана Ивановна

Институт вычислительных систем и программирования  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения  
Санкт-Петербург, Россия  
*skolesnikova@yandex.ru*

Кустова Екатерина Валерьевна

Институт вычислительных систем и программирования  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения  
Санкт-Петербург, Россия  
*astronik00@gmail.com*

**Аннотация.** Цель доклада - исследование целесообразности применения принципов синергетической теории управления к простейшему иммунологическому объекту с исходным описанием в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений с запаздыванием. На основе стохастического алгоритма получены системы управления таким объектом для следующих случаев: 1) объект управления функционирует в полно определенных условиях; 2) на объект действуют детерминированные неизвестные ограниченные возмущения по каналу управления; 3) наличие аддитивного случайного шума по произвольной переменной. Приведены результаты сравнительного численного моделирования полученных систем управления, функционирующих без предварительной фильтрации измерений случайных переменных и с фильтрацией по алгоритму ядерной регрессии.

**Abstract.** The purpose is to investigate the applicability of the principles of the synergetic control theory to a primitive object with the initial description in the form of a system of nonlinear differential equations with a delay. Based on a new stochastic algorithm of a discrete synthesis, systems of control over such an object are designed for the following cases: 1) a control object is functioning under completely determined conditions; 2) a control object is affected by the deterministic unknown constrained disturbances via the control variable; 3) presence of an additive random noise on any variable. The results of a comparative numerical modeling of the designed control systems are presented, which function without any preliminary filtration of the random variable measurements and with a filtration by a kernel regression algorithm.

**Ключевые слова:** иммунология, математические модели инфекционных заболеваний, дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом, гепатит В, синергетическая теория управления.

**Keywords:** immunology, mathematical models of infectious diseases, retarded differential equations, hepatitis B, synergetic control theory.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование биомедицинских (сложных) объектов [1-6] является одним из наиболее надежных инструментов выявления закономерностей протекания большого числа взаимосвязанных физиологических процессов.

Объект имеет неустойчивые режимы, параметрические неточности, и нет причин утверждать, что существуют полно определенные модели. В этой связи крайне важно рассматривать объект как систему, функционирующую в условиях неопределенности, если ставится задача целенаправленного воздействия на объект.

Цель доклада - исследовать физичность и целесообразность применения методов синергетической теории управления [7] (СТУ) для формирования воздействия на иммунную систему (при лечении) на примере вируса гепатита В.

Несмотря на наличие высокоеффективной вакцины от гепатита В имеет место ситуация роста смертности на фоне снижения числа больных. В бюллетене WHO (2017г.) сформулированы стратегии и рекомендации борьбы с инфекционными заболеваниями, в том числе гепатитом, которые должны реализоваться до 2030 года. В этой связи озвучен призыв к применению всех имеющихся научных данных и технических возможностей для ускорения борьбы с вирусами гепатита.

Исторически динамика биоинженерии обязана следующим научным событиям:

- определение кибернетики как «управление и связь в животном и машине» (Н. Винер) [1];
- математическая модель импульсов в сердечной мышце (Н. Винер, А. Розенблют);
- системный подход к обнаружению закономерностей в «живых» объектах» (П.К. Анохин, физиологическая кибернетика) [2];
- модель распространения волны (Колмогоров А.Н., Петровский И.Г., Пискунов Н.С., Фитцхью-Нагумо) [3];
- методология математического моделирования физиологической системы (А.А.Ляпунов) [4];
- дальнейшее развитие указанных направлений в работах отечественных и зарубежных исследователей [2-6, 8-12] (см. обзор [13]).

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ИММУНОЛОГИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ

Для уменьшения повреждения организма при острых формах заболеваний используется иммунотерапия [5]. Рассмотрим описание простейшей модели объекта, разработанной в [5, 6], для которого ранее поставлена задача альтернативного управления [12]:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= a_1 V - a_2 FV - a_9 KV, \\ \dot{C} &= a_3 \xi(m)(F(t-\tau) + K(t-\tau))V(t-\tau) - a_5(C - C^*), \\ \dot{F} &= a_4(C - F) - a_8 FV, \\ \dot{m} &= a_6 V - a_7 m, \\ \dot{K} &= u - a_{10} KV - a_{11} K,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $V, F, C, K$  - концентрации полноценных вирусных частиц, молекул антител, зараженных вирусами клеток и донорских антител в крови, соответственно;  $a_i, i = 1, 11$  - параметры объекта, значения которых соопределяются разной сложности заболевания;  $\xi(m)$  - убывающая функция, которая отвечает за производительность выработки антител при поражении жизненно важных органов, в которой  $m^*$  - граница работоспособности органа:

$$\xi(m) = \begin{cases} 1, 0 \leq m < m^*, \\ \frac{m-1}{m^*-1}, m^* \leq m \leq 1. \end{cases}$$

Состояние модели в начальный момент времени  $t_0$  (зарождение) известно

$$V(t_0) = V_f^0, F(t_0) = F^0, C(t_0) = 0, m(t_0) = 0.$$

Цель управления заключается в обеспечении асимптотической стабилизации функции  $V(t)$  в окрестности заданного значения (количества вирусных частиц в 1 мл объема)  $V^*$ :

$$\psi(t) = V(t) - V^* \rightarrow 0, t \rightarrow \infty. \quad (2)$$

В качестве критерия согласно методологии СТУ принимаем

$$J(\psi) = \int_0^\infty (\psi^2 + T^2 \dot{\psi}^2) dt \rightarrow \min, \quad (3)$$

что согласуется (за счет выбора параметра  $T$ ) с медицинскими требованиями.

## III. СУЩЕСТВУЮЩИЕ РЕШЕНИЯ

В описании медико-биологических объектов, имеющих отношение к инфекционным заболеваниям, присутствуют уравнения «хищник-жертва», придающие исследуемому объекту свойства неустойчивости при определенных сочетаниях параметров объекта и, вследствие этого, сопротивление управлению. В этой связи исследование свойств объектов в свободном состоянии весьма затруднительно («хаос нельзя прогнозировать, но им можно управлять»).

Исследование выполнено при поддержке РФФИ № 20-08-00747.

Математические модели, отражающие инфекционные процессы в организме [5, 6], известны в основном как балансовые модели (без применения внешнего воздействия). Так, простейшая базовая модель динамики заболевания была исследована Г.И. Марчуком [5] (в разных стадиях заболевания), подтверждена экспериментальными данными.

Далее разработанные модели (см. обзор [12]) на основе базовой учитывают разную степень детализации процессов, характеризующих заболевание и основную динамику иммунного ответа, и отражают различные стадии заболевания через параметры модели.

Детальный обзор (немногих) достижений в данной области выходит за рамки доклада, здесь приведены альтернативные подходы, имеющие непосредственное отношение к исследуемому объекту.

В [8] рассмотрен метод синтеза управления восстановлением иммунологического объекта, основанный на теории гарантированного управления, аппарат которого использует подход дифференциальных игр, квадратичный функционал качества, уравнение Рикката, параметры которого есть функции состояния.

В [9] решалась задача поиска оптимальной стратегии управления, минимизирующего среднюю скорость деградации органа (системы) за фиксированное время  $T$  на основе принципа максимума Понтрягина.

В [10, 11] решалась задача оптимального управления в условиях как детерминированных возмущений, так и случайных на базе методов СТУ (постановка задачи в форме (1)-(3) с другим объектом (1)).

Есть основания полагать, что принципы синтеза регуляторов на основе СТУ будут обеспечивать безызбыточное вмешательство в поведение живого организма, поскольку форма применяемых критериев качества управления согласуется с принципом минимального действия.

Управление интерпретировано как процесс лечения заболевшего органа и представляет собой упорядоченный набор пар  $(t, u(t))$ , где  $t$  – момент времени (сут.),  $u(t)$  ( усл.ед.) – рекомендуемое количество лекарственного препарата, поступающего в больной организм.

## IV. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Решение задачи будет основано на стохастическом расширении основного метода СТУ [7] применительно к биомедицинской модели, одно из описаний которой можно встретить в [12] (на базе моделей Г.И. Марчука).

При этом дополнительно к исходному описанию в виде системы дифференциальных уравнений с запаздыванием применены две операции:

1) дискретизация объекта согласно разностной схеме с величиной дискретизации, кратной величине запаздывания (ниже - значение задержки равно параметру дискретизации);

2) включение в полученную дискретную модель случайных ограниченных возмущений.

Случайные функции  $\xi[k+1] + c\xi[k], k \geq 0$ , составляющие которых интерпретируются как возмущения текущие ( $\xi[k+1], t = (k+1)\Delta_0, \Delta_0 > 0, k = 0, 1, \dots$ ) и возмущения в момент конструирования управляющего воздействия ( $c\xi[k], t = k\Delta, 0 < c < 1, k = 0, 1, \dots$ ) со свойством попарной независимости и

$$\mathbf{E}\{\xi[k]\} = 0, \mathbf{D}\{\xi[k]\} = \sigma^2, k = 0, 1, \dots, \quad (4)$$

включаются в правую часть уравнения, отвечающего за динамику управляемой переменной ( $\mathbf{E}\{\zeta\}$ ,  $\mathbf{D}\{\zeta\}$  - знаки математического ожидания и дисперсии для случайной величины  $\zeta$ , соответственно):

$$\begin{aligned} V[k+1] &= V[k] + \Delta_0(a_1V[k] - a_2F[k]V[k] - a_9K[k]V[k]), \\ C[k+1] &= C[k] + \Delta_0(a_3\xi(m)(Y_1[k] + Y_2[k])Y_3[k] - \\ &\quad - a_5(C[k] - C^*)), \\ F[k+1] &= F[k] + \Delta_0(a_4(C[k] - F[k]) - a_8F[k]V[k]), \\ m[k+1] &= m[k] + \Delta_0(a_6V[k] - a_7m[k]), \\ K[k+1] &= K[k] + \Delta_0(u[k] - a_{10}K[k]V[k] - a_{11}K[k]) + \\ &\quad + \Delta_0(\xi[k+1] + c\xi[k]), \\ Y_1[k+1] &= F[k], Y_2[k+1] = K[k], Y_3[k+1] = V[k]. \end{aligned} \quad (5)$$

$\Delta_0$  - промежуток дискретизации (1).

*Комментарий 1.* Связь дискретной (5) и непрерывной (1) систем уравнений осуществляется через дискретизацию по времени (схема Эйлера). В этом случае есть надежда, что система управления, сконструированная для одной системы будет работоспособна и для другой, но только при соблюдении условия равномерной близости решений [14, 15] (ограничение на параметр  $\Delta$  в т.ч.). Однако, этот непростой вопрос требует аккуратного отдельного исследования.

*Комментарий 2.* Особенности конструирования стохастического регулятора позволяют включать возмущения не только по каналу управления, но по другим фазовым координатам (с учетом размерности управления) [16]. Здесь для демонстрации алгоритма взят упрощенный вариант.

Ставится задача стабилизации переменной  $V[k]$  в окрестности заданного значения  $V^*$

$$\mathbf{E}\{\psi(V[k])\} = \mathbf{E}\{V[k] - V^*\} \rightarrow 0, k \rightarrow \infty.$$

Требование на качество управления имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}\{\psi[k+1] + T\psi[k]\} &\rightarrow \min, k \rightarrow \infty; \\ \mathbf{E}\{\Phi\} = \mathbf{E}\left\{\sum_{t=0}^{\infty} \left( \alpha^2 (\psi[t])^2 + (\Delta\psi[t])^2 \right) \right\} &\rightarrow \min. \end{aligned}$$

## V. РЕЗУЛЬТАТЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ ИММУНОЛОГИИ НА БАЗЕ АЛГОРИТМОВ СТУ И ИХ СТОХАСТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

В разделе приведены только результаты конструирования систем управления, более детально с аналогом (описание объекта отличается) вывода ниже излагаемых формул можно познакомиться в [10, 11].

### A. Управление без учета возмущений на основе аналитического проектирования агрегированных регуляторов

$$\begin{aligned} u &= -T_1^{-1}\psi_1(t) + a_{10}KV + a_{11}K + \dot{\phi}(V(t)), \\ \psi(t) &= V(t) - V^*, \psi_1(t) = K - \phi(V), \\ \phi(V(t)) &= a_9^{-1} \left( (1 - V^*V^{-1})T_2^{-1} + a_1 - a_2F \right). \end{aligned}$$

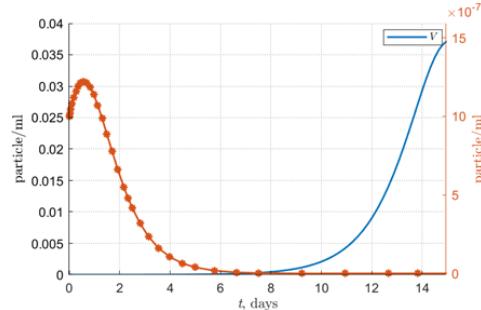


Рис. 1. График фатальной стадии заболевания базовой модели: без управления (синий), с управлением (оранжевый)

Параметры объекта управления фатального уровня заболевания (здесь и далее  $m^* = 0.5; C^* = 1$ ) (рис. 1):

$$\begin{aligned} a_1 &= 1.54; a_2 = 0.77; a_3 = 880; a_4 = 0.15; a_5 = 0.5; a_6 = 12; \\ a_7 &= 0.12; a_8 = 8; a_9 = 0.7; a_{10} = 8; a_{11} = 0.150; \tau = 2.5. \end{aligned}$$

### B. Управление с учетом непрерывных возмущений на основе метода интегральной адаптации

$$\begin{aligned} u(t) &= -T_2^{-1}\psi_2(t) + a_{10}K(t)V(t) + a_{11}K(t) - Z(t) + \dot{\phi}(V, Z), \\ \psi(t) &= V(t) - V^*, \psi_1(t) = \psi(t) + kZ(t), k > 0, \\ \psi_2(t) &= K(t) - \phi(V, Z), Z = \eta \int \psi dt, \eta > 0, \\ \phi(V, Z) &= a_9^{-1} \left( V^{-1} \left( (T_1^{-1} + k\eta) \psi(t) + T_1^{-1}kZ(t) \right) + a_1 - a_2F(t) \right). \end{aligned}$$

Параметры объекта управления хронического уровня заболевания (рис. 2,3):

$$\begin{aligned} a_1 &= 1; a_2 = 0.8; a_3 = 1000; a_4 = 0.17; a_5 = 0.5; \\ a_6 &= 10; a_7 = 0.12; a_8 = 8; a_9 = 0.7; a_{10} = 8; \\ a_{11} &= 0.150; \tau = 0.5. \end{aligned}$$

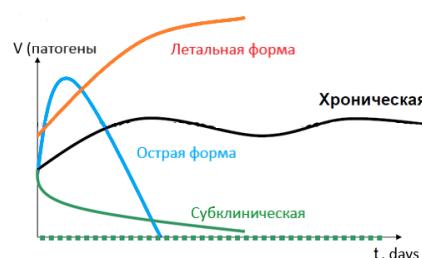


Рис. 2. Форма поведения числа патогенов во времени [5, 6, 12]

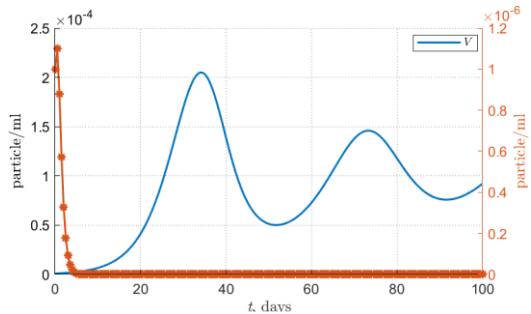


Рис. 3. График хронической стадии заболевания базовой модели. Без управления (синий), с управлением (оранжевый) в условиях ступенчатого возмущения

*Комментарий 3.* Полагали параметры регулятора равными  $T_1 = T_2 = 1$  при моделировании исключительно для иллюстрации самой возможности достижения цели при соблюдении физической непротиворечивости (рис. 1, 3, 4).

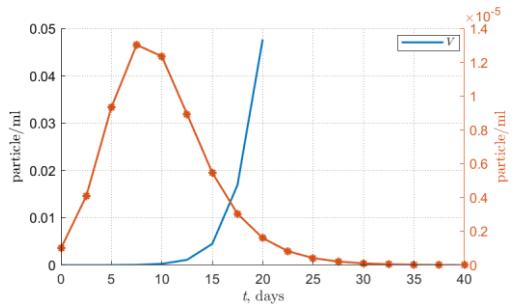


Рис. 4. График фатальной формы заболевания дискретизованной модели (1). Без управления (синий), с управлением (оранжевый) в условиях ступенчатого возмущения

#### C. Решение задачи стохастического управления

1. Получаем структуру регулятора дискретного си для объекта с фиксированными функциями, моделирующие возмущения:

$$\begin{aligned} \tilde{u}[k] &= \Delta_0^{-1} (\varphi_k - \lambda_1 \psi_1[k] - K[k]) + a_{10} K[k] V[k] + \\ &+ a_{11} K[k] - (\xi[k+1] + c \xi[k]), \\ \varphi_k &= (\Delta a_9 V[t_k])^{-1} \psi[t_k] (\omega_2 + 1) + a_9^{-1} (a_1 - a_2 F[t_k]) \Big|_{t_k=(k+1)\Delta_0}. \end{aligned}$$

2. Применяем операцию условного математического ожидания - при фиксированном  $\xi^k = (\xi[0], \dots, \xi[k])$ :

$$\begin{aligned} \tilde{u}[k] &= \mathbf{E}\{\tilde{u}[k] | \xi^k\} = \Delta_0^{-1} (\varphi_k - \lambda_1 \psi_1[k] - K[k]) + \\ &+ a_{10} K[k] V[k] + a_{11} K[k] - c \xi[k]. \end{aligned}$$

3. Подставляя  $\tilde{u}[k]$  в исходное описание, получаем зависимость для случайных функций  $\psi_1[k] + \omega_1 \psi_1[k-1] = \Delta_0 \xi[k]$  (Р-п.н.), подставляем в выражение для  $\tilde{u}[k]$ :

$$\begin{aligned} u[k] &= \Delta_0^{-1} (\varphi_k - \lambda_1 \psi_1[k] - K[k]) + \\ &+ a_{10} K[k] V[k] + a_{11} K[k] - c \Delta_0^{-1} (\psi_1[k] + \omega_1 \psi_1[k-1]). \end{aligned}$$

#### VI. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ФИЛЬТРАЦИЕЙ И БЕЗ

##### A. Мотивация применения ядерной фильтрации к стохастическому объекту управления

Пусть стохастический объект имеет описание

$$Y[k+1] = F[k] + u[k] + \xi[k+1] + c \xi[k], \quad k \in \{0, 1, 2, \dots\},$$

где  $\{\xi[k]\}_{k \geq 0}$  независимые одинаково распределенные некоррелированные случайные величины с нулевым средним и дисперсией  $\sigma^2$ ,  $0 < c < 1$ ;  $F[k] = F(Y[k])$ ,  $u[k]$  - нелинейная функция и управление, соответственно. Тогда дисперсия выходного сигнала

$$\mathbf{D}(Y[k+1]) = \mathbf{D}(F[k] + u[k] + c \xi[k]) + \sigma^2 \geq \sigma^2$$

не может быть меньше дисперсии присутствующего в описании объекта шума при любом управлении (см., например, [17]).

##### B. Алгоритм непараметрической - ядерной фильтрации

1. Выбор размера окна наблюдения (по критерию скользящего контроля на отложенных данных, полученных в результате численного экспериментирования).

2. Выбор ядровой функции  $K(u)$  (здесь ядро – гауссовское):  $K(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}u^2\right)$ .

3. Выбор параметра размытия  $h$  (подбор на отложенных данных с кросс-валидацией).

4. Выбор веса сглаживания  $w_i(x)$  для получения оценки  $\hat{x}(t)$  состояния  $x(t)$  по доступной наблюдению выборке объема  $n$  (рис. 4):

$$\begin{aligned} \hat{x}(t) &= \sum_{i=1}^n x_i w_i(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i K\left(\frac{t-t_i}{h}\right)}{\sum_{i=1}^n K\left(\frac{t-t_i}{h}\right)}, \\ x_i &= x(t_i), \quad \int_{-\infty}^{\infty} K(u) du = 1. \end{aligned}$$

Здесь используется классическая формула Nadaraya-Watson [18]. Случайный шум моделировался как нормальный (табл. 1) с параметрами  $N(0; \sigma)$ .

Важно отметить, что вид вероятностного распределения для конструирования стохастического регулятора не требуется, используемый метод сглаживания данных является непараметрическим.



Рис. 5. Структурная схема стохастического регулятора с ядерной фильтрацией

### C. Сравнительные результаты моделирования с применением ядерной фильтрации и без

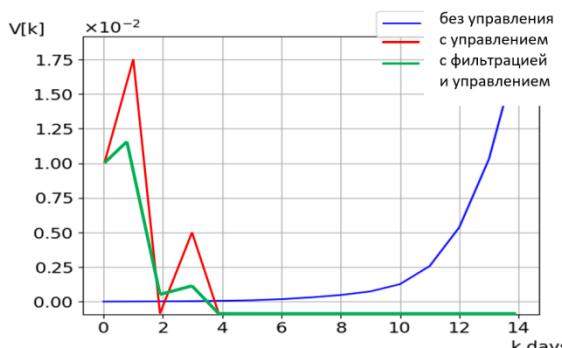


Рис. 6. График фатальной стадии заболевания модели

Заданные требования на допустимое управление  $U_{\min} \leq u(t) \leq U_{\max}$  при необходимости можно учитывать по правилу:

$$u[k] = \begin{cases} 0, & \text{if } u[k] < 0, \\ u[k], & \text{if } 0 \leq u[k] \leq u_{\max}, \\ u_{\max}, & \text{if } u > u_{\max}. \end{cases}$$

*Комментарий 4.* Понятно, что результат ядерной фильтрации существенно зависит от параметра  $h$  – глубины сглаживания. При больших значениях есть опасность потери полезной составляющей. Настройку параметров желательно проводить на отложенных данных для конкретной модели.

Чем больше дисперсия возмущения на входе  $\xi$ , тем ожидаемо хуже качество целевой переменной под управлением детерминированного метода (не учитывавшего аддитивную случайную помеху по каналу управления).

В табл. 1 приведена зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) от целевого значения ключевого показателя  $V$  в зависимости от СКО уровня шума  $\xi$ ,

Обозначения:  $\sigma_A, \sigma_S, \sigma_{FS}, (\times 10^{-6})$  - СКО метода управления без учета шума, стохастического управления (с учетом шума в алгоритме управления) и стохастического управления с ядерным сглаживанием переменных.

ТАБЛИЦА 1. Зависимость стандартного отклонения управляемой координаты объекта от уровня шума

$\sigma(\xi)$	СКО $V$		
	$\sigma_A (\times 10^{-6})$	$\sigma_S (\times 10^{-6})$	$\sigma_{FS} (\times 10^{-6})$
0.5	5.18	5.08	5.06
0.6	5.56	5.05	5.02
0.7	6.32	5.02	4.99
0.9	8.53	5.26	4.94

*Комментарий 5.* В выявленных закономерностях относительно нелинейных систем с хаотическими режимами всегда кроется неточность, связанная с выбором и начальных условий, и параметров объекта и регулятора, и с параметром дискретизации при решении уравнений, и с принципиальной невозможностью полного описания таких объектов.

### D. Сравнительные результаты моделирования алгоритмов на основе СТУ и принципа максимума Понtryгина

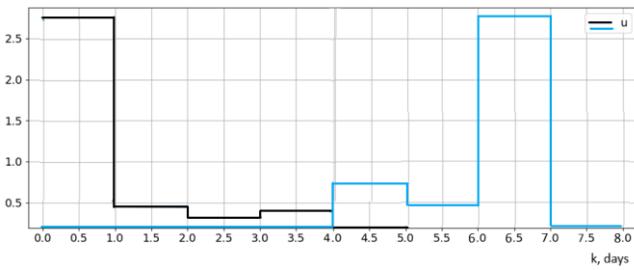


Рис. 7. Иллюстрация динамики лечения острой формы заболевания в двух подходах: стохастический алгоритм на основе СТУ (чёрный) и на основе принципа максимума Понtryгина [12] (синий)

Из рис. 6 следует, что разные подходы дают разные рекомендации по динамике лечения (введение донорских антител) для достижения одной и той же концентрации антигенов. В любом случае, используемый математический аппарат соответствующей СППР носит экспериментальный и рекомендательный характер.

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладе представлен методологический подход на базе стохастического расширения метода СТУ- аналитического проектирования агрегированных регуляторов, реализованный алгоритмически, к математическому моделированию биомедицинских объектов, допускающих вмешательство в динамику основных процессов. На его основе возможно решение основных задач исследования модели:

- обоснованное воздействие на биомедицинский объект в соответствии с определенными каналом управления, свойствами целевой системы и критерием качества формируемого процесса воздействия для формирования базы знаний как совокупности правил «...если, то...»;
- выявление новых закономерностей в динамике процессов при изменении параметров объекта и задания целевых зависимостей;

- обнаружение формы взаимозависимости элементов системы при изменении целевой макропараметральной;
- выяснение условий устойчивости системы в окрестности целевого множества состояний;
- прогностический анализ поведения объекта при параметрических флуктуациях;
- исследование управляемости модели в зависимости от формы внешних возмущений (гладких, случайных).

В связи со стремительным возрастанием спроса на аналитику здравоохранения [19] на базе внедрения цифрового здравоохранения, создание баз знаний в этой отрасли – первоочередная задача. Полученные результаты могут быть использованы при разработке СППР.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wiener N. Cybernetics or Control and Communication in the Animal and Machine. - Paris: The Technology Press and John Wiley and Sons Ync.N.Y.Herman et Cie, 1948. -348 р.
2. Анохин П.К. Избранные труды. Кибернетика функциональных систем / под ред.К.В. Судакова. – М.: Медицина, 1998. – 475 с.
3. Колмогоров А.Н., Петровский И.Г., Пискунов И.С. Исследование уравнения диффузии, соединенной с возрастанием количества вещества, и его применение к одной биологической проблеме // Бюллетеин МГУ. Секция А, 1937. - Т. 1. - № 6. - С. 1-25.
4. Ляпунов А.М. Избранные труды. - Л.: Издательство Академии Наук СССР, 1948. - 521 с.
5. Марчук Г.И. Математическое моделирование в иммунологии и медицине // Избранные Труды. – М.: РАН, 2018. – 650 с.
6. Марчук Г.И., Петров Р.В. Математическое моделирование противовирусного иммунного ответа // Математические модели в иммунологии и медицине. – М.: Мир, 1986. – С. 145-154.
7. Колесников А.А. Синергетика и проблемы теории управления: сборник научных трудов / под ред. А.А. Колесникова. – М.: Физматлит, 2004. – 504 с.
8. Андрюхина В.Н., Афанасьев В.Н. Гарантирующее управление в задаче применения антивирусных препаратов и результаты математического моделирования // Проблемы управления. - 2012. - Вып. 3. – С. 41-48.
9. Болодурина И.П., Луговская Ю.П., Закиров Д.А. Управление динамикой взаимодействия иммунной системы человека с инфекционными заболеваниями // Вестник ТвГУ. - 2009. – С. 101-117.
10. Kolesnikova S.I., Avramyonok V.A. Synergetic control algorithms for a multidimensional biomedical model under conditions of nonrandom and random disturbances using kernel regression // Journal of Physics: Conference Series. - 2021. - DOI: 10.1088/1742-6596/1745/1/012094.
11. Kolesnikova S.I., Avramyonok V.A. Application of stochastic control method on manifold at immunology problem // Journal of Physics: Conference Series. - 2020. - 1515 (5). - DOI: 10.1088/1742-6596/1515/5/052015.
12. Чирков М.В. Методика моделирования управления процессом иммунного ответа в условиях неопределенности: дис. ... канд. ф-м. наук: 05.13.18. Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2017. – 133 с.
13. Vieira L.S., Laubenbacher R.C. Computational models in systems biology: standards, dissemination, and best practices // Current Opinion in Biotechnology. - 2022. - Vol. 75. - https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102702. (дата обращения: 14.08.2022).
14. Ljung L. Analysis of recursive stochastic algorithms // IEEE Trans. Automat. Contr. - 1977. - Vol. 22, No.4. - P. 551-575.
15. Derevitsky D.P., Fradkov A.L. Two models for analyzing dynamics of adaptation algorithms // Autom. Remote Control. - 1974. - Vol. 35, No. 1. - P. 59-67.
16. Колесникова С.И. Синтез стохастического регулятора на многообразиях для нелинейного дискретного объекта // Прикладная информатика. - 2018. - № 6. - С. 18-30.
17. Острем К.Ю. Введение в стохастическую теорию управления. – М.: Мир, 1973. –326 с.
18. Nadaraya E. On Estimating Regression TV and its applications. - 1964. –9 (1). - P. 141-142.
19. Ugalmugle S., Swain R. Digital Health Market Size, 2020-2026, 2020. - URL: https://www.gminsights.com/industry-analysis/digital-health-market (дата обращения: 15.05.2022).

# К истории отечественных исследований земной атмосферы астрономическими методами

Панчук Ася Владимировна

Специальная астрофизическая обсерватория РАН  
Нижний Архыз, Россия  
*panchukasya@gmail.com*

Якшина Татьяна Александровна

Кафедра теоретической и математической физики  
Северо-Кавказский федеральный университет  
Ставрополь, Россия  
*yakshina@mail.ru*

**Аннотация.** Турублентность в атмосфере Земли – один из примеров синергетических процессов. Ниже попытаемся кратко охарактеризовать раннюю историю (конец XIX в. – 60-е годы XX в.) отечественных исследований атмосферной турбулентности астрономическими методами.

**Abstract.** Turbulence in the Earth's atmosphere is one example of synergetic processes. Below we will try to briefly characterize the early history (the end of the XIX century – the 60s of the XX century) of domestic studies of atmospheric turbulence by astronomical methods.

**Ключевые слова:** атмосферная турбулентность, качество изображений звёзд, астроклиматические экспедиции.

**Keywords:** atmospheric turbulence, the quality of images of stars, astroclimatic expeditions.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Исследования оптических свойств атмосферы Земли составляют как самостоятельный естественно-научный интерес, так и прикладной характер. Астрономический климат (далее «астроклимат») как направление сформировался в результате становления и развития методов исследования атмосферной турбулентности, прозрачности, статистики метеорологических характеристик. Главной задачей астроклиматических исследований является поиск и выбор мест, пригодных для сооружения астрономических обсерваторий. Однако в XIX веке большинство обсерваторий было построено из соображений территориальной близости к университетам. Первые астроклиматические концепции были сформулированы только в конце 20-х годов XX в.

В XIX веке, при организации российских университетов учитывались и европейские научные традиции, в частности, шаги прусского реформатора В. Гумбольдта по объединению систем образования и науки. В перечень 17-ти обязательных (профильных) кафедр университетов Российской империи входила кафедра астрономии (космографии). Кафедра имела или астрономический кабинет, или, в лучшем случае, являлась основой для организации астрономической обсерватории. Поэтому обсерватория находилась или в черте города, или неподалеку, под влиянием городской подсветки неба и задымления. Ни о каком выборе места для строительства научного астрономического учреждения, оптимального для проведения наблюдений, не было и речи. В XIX веке были созданы университетские астрономические кабинеты (Москва, 1804 г.; Харьков, 1809 г.), и обсерватории (Дерпт, 1809 г.; Казань, 1814 г.; Варшава, 1820 г.; Нико-

лаев, 1821 г. (позже отделение Пулковской обсерватории); Москва, 1831 г.; Гельсингфорс, 1834 г.; Пулково, 1839 г.; Киев, 1845 г.; Одесса, 1871 г.; Ташкент, 1874 г.; Санкт-Петербург; 1881 г.; Харьков, 1883 г.; Симеизское отделение Пулковской обсерватории, 1912 г.), преимущественно университетские (кроме Пулковской с отделениями, и Ташкентской). Исключая эпизодические полевые экспедиции, экспансия астрономических наблюдений за пределы городов Российской империи была мотивирована двумя причинами – построением геодезической сети из 265 триангуляционных пунктов (вдоль меридиональной дуги протяжённостью 2820 км, (по плану В. Струве), и необходимостью поддержки картографических работ на востоке страны (эти работы находились в ведении Генерального штаба). Первые филиалы Пулковской обсерватории были астрометрическими, т.к. астрофизика как научное направление только зарождалась. Фактор плохих атмосферных условий для астрометрических работ не являлся первостепенным, отражаясь только на продолжительности и сезонном характере выполнения наблюдательных программ. Обсерватории приморских городов (г. Николаев, г. Гельсингфорс, г. Одесса) создавались для обеспечения морской навигации.

В конце XIX - начале XX столетий возникли новые обсерватории, оснащенные телескопами большого диаметра. Сооружение таких телескопов вызывалось растущими потребностями астрофизики, особенно астрономии. В категории загородных горных обсерваторий впереди других стран оказались Соединенные Штаты Америки. На средства благотворителей были построены телескопы Лика (1888 г.) и Йеркса (1897 г.), вошедшие в состав обсерваторий Калифорнийского и Чикагского университетов, соответственно. В 1904 г. была открыта обсерватория Маунт Вилсон, где через 15 лет начал работать самый крупный телескоп-рефлектор, диаметром 2.5 м. При поисках мест установки для больших рефракторов и рефлекторов этих обсерваторий уже использовались визуальные методы оценки качества изображений.

Зарождение российской наблюдательной астрофизики в столичных обсерваториях сразу выявило слабые стороны этих высокосиротных пунктов: 1) большое количество светлых летних ночей (пригодное для измерения координат ярких звезд, но непригодное для астрофотометрии); 2) отсутствие длительных периодов с последовательно повторяющимися ясными ночами, что затрудняло любые фотографические наблюдения с нако-

пительными экспозициями, превышающими продолжительность темного времени одних суток; 3) низкое положение эклиптики, затрудняющее фотометрические исследования планет и поиск астероидов; 4) низкое положение центральных областей Млечного Пути, где сконцентрированы объекты, интересные из астрофизических соображений. Это обстоятельство осознавалось в столицах, и первыми шагами явились попытки перенести астрофизические наблюдения в уже существующие южные обсерватории. Например, в (датированном 1873 г., см. [1]) письме директора Пулковской обсерватории О.В. Струве директору (основанной в 1871 г.) Одесской обсерватории Новороссийского университета Л.Ф. Беркевичу рекомендовалось использовать астрофотометр Цельнера и спектроскопы. О повторяемости ясных ночей в Пулково О.В. Струве отмечал, что «...в течение почти двух лет удалось только два раза получить полные фотометрические наблюдения минимума Алголя.» [2]. Таким образом, уже в третьей четверти XIX века в России использовались критерии «число ясных ночей» и «повторяемость ясных ночей», позже определенные как астроклиматические критерии.

## II. ПЕРВАЯ ГОРНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

Благодаря уникальному климату, во второй половине XIX века небольшой поселок на юге Грузии (Абастуман, позже Абастумани) превратился в известный бальнеологический курорт. С 1891 г. в Абастумани на лечение находился сын императора Александра III – князь Георгий, в образовании которого принимал участие петербургский астроном, профессор С.П. Глазенап. В 1892 г. над поселком была сооружена башня для визуального телескопа-рефрактора. На рефракторе диаметром  $D = 22$  см () Глазенап производил измерения тесных двойных звезд, исследовал изменения блеска переменных звезд разных типов, (см., например, [3]). Высокая прозрачность, спокойствие воздуха и вследствие этого хорошие качества оптических изображений звезд позволяли измерять тесные двойные звезды, изображения которых в обычных условиях почти не разделимы. Итак, следующим астроклиматическим критерием явилось угловое разрешение тесных визуально-двойных звезд. Уже первые результаты двухлетних наблюдений С.П. Глазенапа привлекли внимание астрономов. Бернхэм писал [4]: «...Его (Глазенапа) наблюдения решительно показывают, не только по количеству проделанной работы, но и по характеру звезд, измеренных с помощью небольшого экваториала, что расположение Тифлиса (*имеется в виду Абастумани, авт.*) замечательно благоприятно для астрономической работы. Если можно судить по результатам... ни одна обсерватория в Европе не имеет столь благоприятного расположения, и было бы трудно назвать такую где-либо, кроме обсерватории на горе Гамильтон (*Ликская обсерватория, в выборе места для которой Бернхэм принимал участие, авт.*), где атмосферные условия так же благоприятны... Профессор Глазенап с помощью оптических средств, значительно уступающих всему, чем пользовались его знаменитые предшественники, решил поставить свою страну в выдающееся положение в этой области (имеется в виду изучение двойных звезд)... несомненно, Российское правительство обеспечит ему возможность проведения начатой в Абастумани работы с помощью более мощных инструментов» [4]. Но только через 40 лет, в 1934 г. над

курортом Абастумани (гора Канобили,  $h = 1700$  м ), началось строительство Абастуманской астрофизической обсерватории [5].

## III. ПОИСКИ МЕСТ ДЛЯ ГОРНОЙ РОССИЙСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Об организации Горной Российской астрофизической обсерватории (ГРАФО) долгое время не упоминалось, по-видимому, в связи с тем, что первые организационные шаги были сделаны под руководством В.В. Стратонова, высланного за границу осенью 1922 г. и реабилитированного только в начале 90-х. Экспедиционная деятельность по выбору места для этой обсерватории, начатая под руководством В.Г. Фесенкова ещё в 1921 году на горе Крестовой (г. Кисловодск), с разной степенью регулярности осуществлялась все 20-е годы, продолжая не связанные с ГРАФО немногочисленные работы астрономов-любителей (см., например, [6]). Программа, составленная под руководством В.Г. Фесенкова, включала определение коэффициента прозрачности атмосферы, фотометрию зодиакального света, измерение дрожания изображений звезд, наблюдения планет. Фотометрические исследования зодиакального света, начатые В.Г. Фесенковым ещё в Харькове и Сорбонне (1910-1914 гг.) были развиты в новое направление – фотометрию сумеречного неба [7], где, в т.ч., определялись параметры атмосферы на высотах, в то время недоступных прямым и регулярным измерениям. В конце 20-х стало ясно, что эпизодические стоковые ветры с Яйлы серьёзно искажают изображения, наблюдаемые в рефлектор ( $D = 1$  м ), установленный в Симеизе на участке, подаренном Пулковской обсерватории (т.е., не определённом из астроклиматических соображений), см. [8]. Поэтому, кроме коротких экспедиций московских астрономов (1925-1926 гг.), территория Крыма была обследована симеизскими астрономами, что позволило приступить к строительству Крымской астрофизической обсерватории (КрАО АН СССР) сразу после окончания второй мировой войны [9]. Первыми инструментами новой обсерватории были телескопы и камеры, полученные по репарациям, в качестве компенсации за оборудование, уничтоженное в годы войны. Но высота КрАО не позволяет считать её высокогорной обсерваторией, тем более, связанной с уже забытым проектом ГРАФО. В конце 20-х было исследовано качество звездных изображений в Ташкенте [10], но реализуемость среднеазиатских проектов в то время серьёзно не рассматривалась, из-за проблем коммуникации и кадрового обеспечения. Идея ГРАФО [11], как совокупности распределенных по долготе наблюдательных станций, рассматривалась в качестве отдаленной перспективы. В качестве штаб-квартиры ГРАФО предлагалась Одесса, где, рядом с университетской обсерваторией, была организована народная обсерватория, оснащенная рефлектором ( $D = 30$  см). В летнее время этим телескопом пользовались столичные исследователи переменных звёзд [12], составившие потом научную школу, получившую мировое признание.

25-30 апреля 1931 г. в Ленинграде Астрономическим Институтом было созвано совещание по вопросу организации Горной Астрономической Обсерватории (ГорАО) на юге СССР, [13]. На совещании были представлены: Астрономо-Геодезический Институт, (Москва), Астрофизический Институт (Москва), Астрономическая Обсерватория (Ташкент), Астрономическая Обсерватория

(Харьков), Астрономическая Обсерватория (Казань), Обсерватория им. Энгельгардта (близ Казани), Астрономическая Обсерватория (Симеиз), Метеорологическая Обсерватория (Курск), Геофизическая Обсерватория Грузии (Тифлис), Средне-Азиатский Метеорологический Институт (Ташкент), Гидрометкомитет СССР (Москва), Академия Наук (комиссия по исследованию Солнца, КИСО), Астрономическая Обсерватория в Пулкове, Главная Геофизическая обсерватория (ГГО, Ленинград), Аэрологический Институт (Слуцк), Актинометрический Институт (Слуцк), Институт Геодезии и Картографии (Ленинград), Оптический Институт (Ленинград), Завод Оптического Стекла (Ленинград), Главная Палата Мер и Весов (Ленинград), участие приняли и 23 сотрудника Астрономического Института (АИ, Ленинград). Было заслушано 43 доклада по вопросам: характеристики различных районов СССР, методики и плана экспедиционных работ по обследованию мест будущей обсерватории, задач будущей обсерватории, по вопросу о конструировании и возможности осуществления постройки больших астрономических инструментов. Были отмечены важность и необходимость организации систематической службы Солнца и звезд на территории СССР. В духе времени предполагалось практическое использование деятельности ГорАО для нужд геофизики. Поэтому совещание особенно подчеркнуло необходимость создания Горной Астрофизической Обсерватории в комплексе с Геофизической. Отмечены основные направления деятельности ГорАО, и составлен список инструментов, конструкция которых должна стать задачей научных учреждений и заводов.

Совещание признало необходимым в 1931 г. обследовать по единой программе следующие районы и отдельные места:

- а) Симеиз, окрестности Симферополя, Яйла, Карадаг, силами Симеизского отделения Пулковской Обсерватории, Научно-исследовательского Института в Симферополе и Астрономо-Геодезического Института в Москве;
- б) Армения: вершины и склоны горы Алагез, силами Ереванской Астрономической Обсерватории, Астрономо-Геодезического Института в Москве, при содействии ГГО;
- в) район Бакурьяни и Боржома, силами Геофизической Обсерватории Грузии и АИ;
- г) район Кисловодска, Бештау, Столовая Гора, силами Астрономической Обсерватории Ростовского Университета, Астрофизического Института в Москве и Актинометрического Института в Слуцке;
- д) Средняя Ферганская долина, район Оша, силами Ташкентской Обсерватории, Средне-Азиатского Метеорологического Института и АИ;
- е) Азербайджан, силами Азербайджанского Гос. Научно-Исследовательского Института и АИ;
- ж) Украина, лесолуговая область между Киевом и Харьковом.

Все экспедиции должны были вести наблюдения по общей программе, придерживаясь инструкций, выработанной на совещании [14]. Из-за недостатка экспедиционных инструментов и недостатка времени, все требования программы и инструкций выполнить не удалось.

В план работ горной Астрофизической Обсерватории были включены: солнечные наблюдения, наблюдения звезд, а также изучение спиральных и других туманностей. Из планируемого состава оборудования ГорАО предполагалось установить короткофокусный астрограф небольшого размера, горизонтальную установку для наблюдения Солнца, 13-дюймовый рефлектор, объективный фотометр, компаратор, спектрофотометр, фотоэлектрический фотометр и кварцевый спектрограф. Во вторую очередь - короткофокусный астрограф большого размера, в третью - большой вертикальный солнечный телескоп, в четвертую - большой 60-дюймовый рефлектор ( $D = 152$  см). Совещание 1931 года обратилось в ВСНХ с просьбой «обеспечить в промфинпланах по металлу, оптическому стеклу и точному приборостроению удовлетворение потребностей астрофизики и гелиофизики». В итоге, уже в 1932 году над территорией Абастумани был установлен первый телескоп-рефлектор отечественного производства ( $D = 33$  см), который, вместе с визуальным (т.е., непригодным для фотографических работ), рефрактором ( $D = 40$  см), составил инструментальную основу Абастуманской астрофизической обсерватории. Таким образом, большинство астроклиматических исследований, выполненных в 20-30-е годы, привели к решению, что лучшего места, чем обнаруженное (но не выбранное) проф. С.П. Глазенапом, для Главной астрофизической обсерватории, не существует.

#### IV. ПОСЛЕВОЕННЫЕ АСТРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эти исследования прошли под флагом поиска места для сооружения обсерватории, в состав которой должен был войти самый большой телескоп в мире. Так как в США уже работал Паломарский телескоп имени Дж.Э.Хэйла ( $D = 5$  м), в 1956 г. правительство объявило о решении построить Большой телескоп азимутальный (БТА,  $D = 6$  м). Предварительно отечественная оптико-механическая промышленность должна была «взять» рубежи 1.5 м и 2.5 м, классические для развития западных обсерваторий. Зеркальный телескоп имени В.П. Энгельгардта (ЗТЭ,  $D = 125$  см), был завершен в 1960 г. и установлен в Крыму в 1962 г. К этому времени рядом уже проходил испытания крупнейший в Европе телескоп имени акад. Г.А. Шайна (ЗТШ,  $D = 254$  см). Эти телескопы устанавливались в уже выбранном месте. Высокими темпами восстанавливалась Пулковская обсерватория (ГАО АН СССР), где число новых инструментов заметно превзошло число утерянных. У тех, кто не понимал, что восстановление разрушенной Главной обсерватории является преимущественно политическим проектом, возникали сомнения о целесообразности установки новых инструментов в месте, которое уже более 70 лет как признано непригодным для эффективных астрофизических исследований [15]. Так что вопрос о поиске новых мест для обсерватории Большого телескопа определенное время не рассматривался как первостепенный. Основной потенциал отечественной астрономии второй половины 50-х годов составляли сотрудники ГАО АН СССР: восемь научных отделов (включая Отдел радиоастрономии), два филиала – отделение в г. Николаеве и Горная станция под Кисловодском, около 90 научных и научно-технических сотрудников при полном штате 240 человек, 20 действующих на территории Пулкова телескопов. До образования САО АН СССР, все

работы по выбору места, вариантов конструкции или управления 6-метровым телескопом, по проектированию его отдельных элементов и узлов выполнялись под эгидой ГАО, т.к. директор обсерватории А.А. Михайлов являлся председателем межведомственной комиссии по строительству БТА. Программа по выбору места для БТА была составлена в духе концепции Данжона-Кудэ [16, 17], основанной на исследованиях, проведенных в Страсбурге ( $h = 142$  м) в конце 20-х. Грубое разбиение шкалы оценок качества звездных изображений (на 5 баллов, с предельной точностью оценки в 0.5 балла) не позволили уточнить диапазон высот в атмосфере, на которых создаются основные турбулентные помехи. Уточнение связывалось определением формы зависимости от зенитного расстояния  $z$ , согласно которой угловые размеры турбулентного диска звезды увеличиваются к горизонту. Телескоп БТА уже был установлен, а дебаты продолжались [18].

Влияние ГАО на дела по БТА значительно уменьшилось с кончиной Д.Д. Максутова (август 1964 г.), и руководителя работ по астроклимату Н.И. Кучерова (октябрь 1964 г.), активных проводников идеи большого телескопа. Самой крупной потерей ГАО была передача в другие руки (САО АН СССР) дела строительства 6м телескопа (1966 г.). Это была потеря престижа, утрата возможности вернуть статус «астрономической столицы мира». Сохранить за собой руководство перспективным делом Пулковская обсерватория не могла, по-видимому, из-за ухода лидеров и отсутствия кадровых резервов. Штаты восстановленной обсерватории были заполнены не постепенно, а быстро, в течение двух-трех лет, что впоследствии привело к практически одновременному стиранию основной части коллектива.

Согласно концепции Данжона-Кудэ, основные «не-приятности» для астрономов производятся на высоте около 4 км. Принимая это за истину, непонятной становилась продуктивность горных обсерваторий первой половины XX века (все они расположены ниже  $h = 3$  км). С другой стороны, принимая концепцию Данжона-Кудэ, место для обсерватории следовало искать на равнинах, где приземный слой не возмущен обтеканием рельефа. Отсюда следовал вывод с практическими последствиями – место для установки планетного телескопа в экспедициях, возглавляемых акад. Г.А. Тиховым, искали на просторах Казахской ССР.

Важной характеристикой любого места, где предполагается строительство обсерватории, является количество ясных ночей или, точнее, количество ясного времени. Университетские обсерватории располагались либо непосредственно в черте города, либо недалеко за городом. Бурное расширение городов привело к возрастанию уровня засветки ночного неба городским освещением и к росту запыленности атмосферы. Поэтому роль университетских обсерваторий в проведении передовых астрофизических наблюдений вплоть до последней четверти XX века была невелика. Первые южные «неуниверситетские» обсерватории (Симеизская, Абастуманская), хоть и располагались в местах, не подсвечиваемых крупными населенными пунктами, все-таки были расположены не в самых оптимальных местах. Астроклимат как научное направление сформировался в начале 60-х годов прошлого столетия, когда большинство действующих сего-

дня обсерваторий уже было построено. Была разработана совокупность методов, позволяющих оценить пригодность исследуемого места (по количеству ясных ночей и качеству звездных изображений), для эффективной работы крупных телескопов. Большинство этих методов являлись косвенными, т.к. качество звездных изображений на большом телескопе зависит и от астроклимата башни. В СССР несколько научных групп выполнили исследования различных районов, перспективных для строительства новых обсерваторий. На первое место вышли некоторые вершины Средней Азии и Памира.

В середине XX века стало ясно, что очень трудно выбирать место для большого телескопа с помощью маленького инструмента. На качество изображения влияют как крупные, так и мелкие неоднородности атмосферы; небольшой телескоп регистрирует первые как смещение, вторые же – как размытие изображения; разобраться в совокупности этих явлений далеко не просто. Чтобы анализировать влияние всех атмосферных неоднородностей, нужно имитировать крупный инструмент хотя бы с помощью перископической насадки, с такой же чувствительностью к искажениям изображения, что и у большого телескопа. Для уверенного суждения о качестве данного места с астрономической точки зрения нужны многолетние ряды наблюдений; ограничение несколькими месяцами может привести к грубым ошибкам. Важную роль играют условия локального микроклимата; следует по возможности выбирать места с малыми суточными перепадами температур вблизи инструмента. Быстрое развитие телескопостроения в послевоенном СССР не оставляло времени для длительных исследований астроклимата в районах, новых для астрономов.

Крупный инструмент должен устанавливаться в месте с большим числом ясных ночей, так как его огромная стоимость должна окупаться самым эффективным образом. По совокупности астроклиматических характеристик наиболее подходящими считались вершины в Средней Азии. Но их исследование осуществлялось уже в период, когда основное внимание государства было сосредоточено на создании и установке 6-метрового телескопа (обсерватория на Северном Кавказе уже строилась). «Следует обратить серьезное внимание на установку крупных телескопов в Средней Азии с ее несравненно более благоприятными для наблюдений климатическими условиями» – эта позиция главного идеолога астроклиматических исследований 60-70-х годов П.В. Щеглова [19] объединила астрономов-наблюдателей Ташкента, ГАИШ, Киева, Ленинграда, Литвы, вокруг создания новой обсерватории на горе Майданак (УзССР), где среднегодовое число ясныхочных часов составляет около 2000 ч. Среднее качество изображений для горы Майданак равно 0."7, а средняя скорость ветра для ясных ночей – 2.8 м/сек. Проблемы эффективности, связанные с сезонной мелкодисперсной запыленностью атмосферы, не рассматривались. Неприятие способа и выбора места установки БТА доходило до такой степени, что авторы публикаций [20, 21] о проекте БТА вообще не упоминали.

## V. Выводы

Астроклиматические исследования в нашей стране, при обсуждении и принятии решений сталкивались с необходимостью учета других факторов (стоимость со-

оружения новых коммуникаций, внутриполитическая ситуация, мировой престиж науки и технологий и связанные с этим директивные сроки выполнения проекта). В итоге эти факторы оказывались сильнее. Однако, в плане повышения эффективности инструментов, исследования астроклимата на уже построенных обсерваториях не лишены смысла.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Корпун Я.Ю., Цесевич В.П.* Александр Константинович Кононович, выдающийся украинский астрофизик; его предшественники и ученики // Историко-астрономические исследования. Вып. II. – М.: ГИТГЛ, 1956. – 420 с. – С. 2 89-352.
2. Главная астрономическая обсерватория в Пулкове. 1839-1917 гг. // Сб. документов / под ред. В.К. Абалакина. – СПб.: Наука, 1994. – 335с. – С. 158-159.
3. *Глазенап С.П.* Друзьям и любителям астрономии. – 2-е изд. – СПб., 1909. (Издание третье, дополненное и переработанное / под ред. проф. Б.А. Воронцова-Вельяминова, ОНТИ, М.-Л., 1936, 223 с.)
4. *Burnham S.W.* Astronomy in Russia // Astronomy and Astrophysics. – 1893. – Vol. XII, No. 117. – P. 595-596.
5. *Харадзе Е.К.* Абастуманская астрофизическая обсерватория. Изд. АН СССР, М., 1958. – 38 с.
6. Чикин А.А. Наблюдения над телескопическими изображениями в г. Асхабаде. // Журнал Российского Общества Любителей Мироведения (РОЛМ). – 1916. – № 4 (22). – С. 187.
7. Фесенков В.Г. К исследованию стратосферы путем фотометрического анализа сумерок. Москва – Ленинград: Изд-во Академии Наук СССР, 1934. – 15 с.
8. Газе В.Ф. Выбор места для Крымской астрофизической обсерватории // Известия Крымской астрофизической обсерватории. – 1948. – Т. 3. – С. 99-108.
9. *Добронравин П.П.* Крымская астрофизическая обсерватория Академии наук СССР. // Природа. – 1950. – № 9. – С. 83-88.
10. *Субботин А.Ф.* Наблюдения изображений звезд на Ташкентской обсерватории // Труды Ташкентской астрономической обсерватории. – 1930. – Т. 3. – С.79-83.
11. *Стратонов В.В.* Главная Российская астрофизическая обсерватория // Труды Главной Российской астрофизической обсерватории. – 1922. – Т. 1. – С. 1-27.
12. *Цесевич В.П.* О времени и о себе: воспоминания и документы. (составители: Кошкин М.И., Мищенко Т.В.). – Одесса: «Астропринт», 2007. – 80 с.
13. *Нумеров Б.В.* Совещание по организации Горной астрономической обсерватории // Бюл. Астрон. ин-та. – 1931. – № 28. – С. 87-94.
14. Краткая программа по выбору места Горной Астрономической обсерватории // Бюллетень Астрономического Института. – 1931. – № 29. – С. 95-102.
15. *Гурштейн А.А., Иванов К.В.* Возрожденная по указанию свыше // Природа. – 1995. – № 10. – С. 124-126.
16. *Danjon A., Couder A.* Lunette et Telescopes. – Paris, 1935.
17. *Данжсон А. и Кюэ А.* Атмосферное волнение // Астрон. Журнал. – 1940. – Т. 17. – С. 77.
18. *Васильев О.Б., Нелюбин Н.Ф.* Исследования качества астрономических изображений в месте установки БТА. // Астрофизические исследования (Изв. САО АН СССР). – 1970. – Т. 1. – С. 125-134.
19. *Щеглов П.В.* Проблемы оптической астрономии. ФМ, Наука, М., 1980. – 271 с.
20. *Efremov Yu.N., Novikov S.B., and Shcheglov P.V.* Soviet Physics Uspekhi. – 1975. – Vol. 18. – P. 151-160.
21. *Novikov S.B. and Shcheglov P.V.* Priroda. – 1973. – Vol. 11. – P. 36.

# О верификации нестационарных численных моделей конвективных облаков на результатах экспериментальных радиофизических исследований в Северо-Западном регионе России

**Михайловский Юрий Павлович**  
Отдел геофизического мониторинга  
и исследований  
Главная геофизическая обсерватория  
им. А.И. Воейкова  
Санкт-Петербург, Россия  
*yupalych@ya.ru*

**Торопова Марина Леонидовна**  
Отдел геофизического мониторинга  
и исследований  
Главная геофизическая обсерватория  
им. А.И. Воейкова  
Санкт-Петербург, Россия  
*marina-toropova@mail.ru*

**Синькевич Андрей Александрович**  
Отдел геофизического мониторинга  
и исследований  
Главная геофизическая обсерватория  
им. А.И. Воейкова  
Санкт-Петербург, Россия  
*sinkevich51@mail.ru*

**Куров Александр Борисович**  
Отдел геофизического мониторинга  
и исследований  
Главная геофизическая обсерватория  
им. А.И. Воейкова  
Санкт-Петербург, Россия  
*remotesensing@mail.ru*

**Веремей Николай Евгеньевич**  
Отдел геофизического мониторинга  
и исследований  
Главная геофизическая обсерватория  
им. А.И. Воейкова  
Санкт-Петербург, Россия  
*veremey@gmail.com*

**Довгалюк Юлия Александровна**  
Отдел геофизического мониторинга  
и исследований  
Главная геофизическая обсерватория  
им. А.И. Воейкова  
Санкт-Петербург, Россия  
*dovgaluk35@mail.ru*

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы верификации трехмерной нестационарной численной модели конвективного облака на результатах экспериментальных исследований облаков в Северо-Западном регионе. Были использованы как самолетные, так и наземные радиофизические методы и средства контроля облаков. Основное внимание уделялось сравнению электрических характеристик модельных и экспериментальных облаков. Этот подход представляется перспективным, так как процессы электризации определяются всей совокупностью динамических и микрофизических процессов.

**Abstract.** The issues of verification of a 3-dimensional unsteady numerical model of a convective cloud based on the results of experimental studies of clouds in the Northwest region are considered. Both aircraft and ground-based radiophysical methods and cloud monitoring tools were used. The main attention was paid to the comparison of the electrical characteristics of model and experimental clouds. This approach seems promising, since electrification processes are determined by the totality of dynamic and microphysical processes.

**Ключевые слова:** Конвективные облака, численное моделирование, верификация, электрическое поле, радиолокация, пеленгация молний, самолет-лаборатория.

**Keywords:** Convective clouds, numerical modeling, verification, electric field, radar, lightning direction finding, laboratory aircraft.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант № 22-27-20031) и Санкт-Петербургского научного фонда (Соглашение № 58/2022 от 15 апреля 2022 г.).

## I. ВВЕДЕНИЕ

Конвективные облака являются источником различных опасных явлений погоды (ОЯП), представляющих опасность для жизни людей и функционирования различных отраслей промышленности. Физика процессов в конвективных облаках остается во многом неисследованной. Численное моделирование (ЧМ) является мощным средством изучения этих процессов во всем их многообразии и взаимодействии. Залогом успешности использования численных моделей для этих целей является качественная верификация существующих численных моделей на достоверных данных экспериментальных исследований (ЭИ).

Важным моментом, во многом определяющим успешность верификации ЧМ, является подбор сравниваемых параметров ЧМ и ЭИ [1]. Электрические явления в облаках принадлежат к числу наиболее опасных явлений погоды. Экспериментальным исследованиям процессов электризации конвективных облаков посвящено большое количество статей у нас в стране и за рубежом [1–6]. Современные представления о процессах электризации частиц в облаках и формирования зарядовой макроструктуры базируются на главенствующей роли крупных ледяных частиц [4–9]. Радиолокационная отражаемость облака выше нулевой изотермы также определяется концентрацией и размерами этих частиц [9–12]. Тесные и устойчивые статистические связи между электрическими и радиолокационными параметрами подтверждаются многочисленными исследованиями у нас в стране и за рубежом [10, 11, 13, 14]. Эти связи прослеживаются как при анализе экспериментальных данных в различных регионах, так и в численных экспериментах на моделях [15–17].

В работах [1, 9, 16] авторы, основываясь на результатах самолетных экспериментов с синхронным измерением радиолокационных характеристик и напряженности электрического поля ( $E$ ) облаков, предлагают использовать в качестве характеристик электрического состояния облака интегральные радиолокационные параметры, характеризующие количество крупных ледяных частиц в облаке. К таким параметрам относится, в частности, объем переохлажденной части облака выше определенного уровня, например, с отражаемостью более  $35 \text{ dBZ}$ . Заметим, что измерения  $E$ , используемые в исследований, проводились над облаком. Измерения  $E$  внутри облаков характеризуются значительными погрешностями, величина и характер распределения которых неизвестен. Этот момент является очень важным для исследований начальной стадии электризации. На стадии перехода облака в грозовое состояние в качестве параметра, характеризующего электрическое состояние, обычно используется частота молний, фиксируемая радиотехническими системами местоопределения молний (ГПС).

Практически каждое исследование представляет собой попытку построения фрагмента эмпирической модели (ЭМ) определенного этапа процесса электризации [2, 9, 18, 19]. Эти ЭМ часто существенно различаются используемыми средствами контроля, контролируемыми параметрами, методиками контроля и анализа, условиями развития облаков, регионами исследований и другими факторами [1, 2, 5, 8–11, 15, 20]. Это затрудняет обобщение отдельных исследований и поиск общих закономерностей развития электризации конвективных облаков. Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова представляет результаты многолетних исследований развития процесса электризации конвективных облаков. Сделаны попытки выявления общих закономерностей и условий начала организованной электризации и начала молниевой активности [1, 5, 9, 12]. Мощным средством исследования облаков является теоретическое моделирование и численные эксперименты [16, 17, 21]. Необходимым условием успешного развития численных моделей является их верификация по экспериментальным данным и физико-статистическим эмпирическим моделям [1, 9, 16]. В последние годы в условиях бурного прогресса электронно-вычислительной техники интенсивно развивается численное моделирование атмосферных процессов. Численные модели являются одним из важнейших инструментов исследования конвективных облаков и связанных с ними осадков. Они дают возможность получать пространственно-временное распределение основных характеристик облака (вектор скорости воздушного потока, содержание облачных частиц и осадков и др.), непосредственное измерение которых в натурных условиях затруднено. Модели позволяют воспроизвести процесс эволюции облака в разных условиях (путем варьирования тех или иных параметров) и выполнять физическую интерпретацию и анализ получаемых результатов. Модели облаков незаменимы при интерпретации результатов воздействий на облака, т.к. они позволяют выполнять моделирование облаков с воздействием и без него, определяя эффект воздействий, как соответствующую разницу.

На сегодняшний день разными авторами разработано много моделей разного уровня сложности, в том числе разной пространственной размерности (одномерные,

двумерные, трехмерные). Под размерностью модели понимают количество пространственных координат, от которых зависят физические величины. Например, для одномерных моделей учитывается только изменение величин по высоте. Для двумерных рассматриваются высота и одна горизонтальная координата (декартова или цилиндрическая). Трехмерные модели имеют дело с полным набором координат – как правило, декартовых. Следует выделить так называемые полуторамерные модели, в которых зависимость величин от вертикальной координаты вычисляется при решении уравнений, а от горизонтальной – задается заранее определенным (упрощенным) образом (выполняется осреднение по горизонтали). Кроме того, существуют так называемые нуль-мерные модели, когда рассматривается всплывающая частица с однородным объемом внутри (лагранжев подход).

Кроме размерности, модели различаются способом описания гидродинамики воздушной среды (от использования приближения Буссинеска до решения полной системы уравнений Навье-Стокса); способом описания микрофизических процессов (детальное или параметризованное); наличием или отсутствием учета тех или иных физических процессов (образование ледяной фазы, электризация облачных частиц, влияние на облако аэро-зольных примесей и др.).

Обзор параметризаций облачных процессов, применяемых в моделях, приведен в работе [22].

## II. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ

### A. Нестационарная трехмерная численная модель конвективного облака с параметризованной микрофизикой

В ГГО совместно с ЦАО, ВГИ и НПО «Тайфун» разработана численная нестационарная трехмерная модель конвективного облака с параметризованным описанием микрофизических процессов [16, 17, 21, 22]. Она пригодна для моделирования как отдельного облака, так и двух и более взаимодействующих облаков. Ниже приведено ее краткое описание, а также представлены примеры результатов моделирования взаимодействия двух облаков. Отметим, что применение указанной модели для исследования облаков является подходом, альтернативным по отношению к использованию мезомасштабных моделей. Преимуществом данного подхода является достаточно простая интерпретация получаемых результатов, возможность использования малых шагов по пространству и времени ( $50\text{--}200 \text{ м}$  и  $0,01\text{--}0,5 \text{ с}$  соответственно), а также упрощения, связанные с отсутствием необходимости явного учета синоптической ситуации. В дальнейшем еще предстоит определить условия, когда применение каждого типа из указанных моделей является наиболее оптимальным, что является перспективным направлением исследований.

Рассматриваемая модель включает уравнения гидродинамики сжимаемой среды, а также баланса энергии, массы и заряда, дополненные выражениями для расчета интенсивностей микрофизических процессов (фазовые переходы, коагуляция, электризация облачных частиц). Микрофизические процессы описываются в параметризованном виде. Учтено поле фонового ветра. Данная модель описывает основные процессы, присущие конвективным обла-

кам, в том числе те, которые не могут быть описаны в моделях меньшей размерности (сдвиг ветра по высоте, компенсирующие движения воздуха, значительные горизонтальные неоднородности физических величин и др.) и позволяет получать трехмерную пространственную картину распределения исследуемых характеристик. В модели учитывается целый ряд важных процессов, связанных с электризацией облачных элементов. В качестве входных данных используются вертикальные профили температуры и влажности, получаемые обычно из результатов радиозондирования атмосферы, а также электрическое состояние невозмущенной атмосферы. Выходными данными являются пространственно-временные распределения температуры, скорости движения воздуха, содержания облачных капель, дождевых капель, ледяных кристаллов и градин, радиолокационной отражаемости, плотности распределения электрического заряда и других величин. Модель реализована на суперкомпьютере «Ломоносов», создан и зарегистрирован реализующий ее пакет программ (Свидетельство о государственной регистрации №2012618057 от 19.01.2012 г.).

Исходная система уравнений для мгновенных значений физических величин применительно к случаю движения многофазной системы, использованная при выводе уравнений модели, приведена в [16, 17, 21]. Она включает уравнения неразрывности, движения, энергии и переноса массы частиц конденсированной фазы, а также дополнена уравнением состояния.

Указанные уравнения получены при следующих основных допущениях:

1. Температура капель и ледяных частиц предполагается равной температуре окружающего воздуха (время температурной релаксации для конденсированной фазы полагается пренебрежимо малым по сравнению с шагом по времени).

2. Давление в газовой фазе равно давлению в жидкой фазе (это справедливо в случае, когда малы эффекты поверхностного натяжения, и характерное время исследуемого макропроцесса во много раз превышает время установления равновесного давления между фазами).

3. Время скоростной релаксации частиц мало, т.е. в момент возникновения они уже двигаются относительно окружающей среды с установленнойся скоростью гравитационного падения (берется средневзвешенное значение этой скорости).

4. В облаке при наличии облачных капель среда находится в состоянии термодинамического равновесия, т.е. парциальное давление водяного пара равно давлению насыщения относительно плоской поверхности воды.

Известно, что конвективное облако является сильно турбулизованной системой. Поэтому далее было выполнено осреднение исходной системы по Рейнольдсу. При описании членов, содержащих корреляции пульсаций плотности с другими величинами, применен подход Фавра. В результате уравнения упрощаются. Для описания турбулентности использовался полуэмпирический подход ( $K$ -модель).

Предполагалось, что вся влага, присутствующая в облаке, разделена на водяной пар, облачные капли, дождевые капли, облачные ледяные кристаллы и ледяные

частицы осадков. При этом воздух и водяной пар образуют несущую паровоздушную среду, а остальные субстанции представляют собой конденсированную фазу; для каждой из этих субстанций записывается уравнение переноса массы.

В модели учтены процессы электризации облачных частиц, пространственного распределения зарядов и образования электрических полей. К вышеперечисленным уравнениям добавлены уравнения переноса электрических зарядов, вид которых в целом аналогичен виду уравнений переноса массы частиц конденсированной фазы.

Полученная система дополнена параметрическими выражениями для вычисления интенсивностей микрофизических процессов, с помощью которых рассчитываются источники и стоки субстанций в уравнениях переноса массы и зарядов.

*B. Используемые дистанционные радиофизические средства контроля параметров конвективных облаков наземного базирования в Северо-Западном регионе*

1) Доплеровский метеорологический поляризационный радиолокатора ДМРЛ-С;

Для северо-запада России использовалась информация радиолокатора ДМРЛ-С, расположенного вблизи города Санкт-Петербург ( $59^{\circ}57'$  с.ш.,  $30^{\circ}42'$  в.д. Основные технические характеристики радиолокатора ДМРЛ-С

Длина волн, см 5,3–5,5.

Ширина луча, град 1,0.

Чувствительность, дБ/Ватт -142.

Максимальная дальность обнаружения метеообъектов (при отражаемости 0 дБZ), км 250 .

2) Радиометрическая аппаратура радиометра SEVIRI, установленного на спутник Метеосат;

Метеосат 8, 9, 10, 11 европейские метеорологические спутники второго поколения MSG (Meteosat Second Generation), которые применяются в настоящее время для метеорологических наблюдений [3-5]. Они располагаются на геостационарной орбите около 36000 км над экватором, спутники Метеосат -8, -9 , -10 и -11 работают над Европой и Африкой.

SEVIRI (Spinning Enhanced Visible-Infra-Red Imager) - оптический сканер, работающий в 12 спектральных каналах. Радиометр SEVIRI, установленный на спутниках MSG, имеет 12 каналов, которые позволяют получать изображения поверхности Земли каждые 5 (MSG-3) и 15 минут (MSG-1,2,4). Канал высокого разрешения (HRV) в видимом диапазоне имеет разрешающую способность (в подспутниковой точке над низкими широтами) 1 км, остальные каналы – 3 км.

3) Грозопеленгационные системы (ГПС) «Blitzortung» и «Алвес».

В Европе широко используется современная грозопеленгационная сеть Blitzortung (Blitzortung.org). Она состоит из VLF приемных станций и одного центрального сервера обработки для каждого большого района. Приемные станции передают свои данные в реальном времени через Интернет на сервер. Каждая посылка содержит данные о точном времени приема излучения молнии и коор-

динат приемника. Методика определения расположения молний основана на расчетах гиперболических кривых (гиперболический метод) ([blitzortung.org](http://blitzortung.org)).

В Росгидромете создана сходная грозопеленгационная система Алвес. В ней также используется разностно-дальномерный метод определения координат грозовых разрядов по разности времен прихода атмосфериков (электромагнитное излучение молниевого разряда) в территориально разнесенные пункты регистрации. Синхронизация измерений осуществляется с использованием навигационных систем GPS и/или Глонасс. Для этого в датчиках применяется два приемника — сверхдлинноволновый для приема и обработки атмосфериков в СДВ диапазоне и приемник GPS и/или Глонасс для синхронизации [23].

4) Дистанционные радиофизические средства контроля параметров конвективных облаков самолетного базирования в Северо-Западном регионе

а) бортовой метеорологический локатор

– РЛС «Гроза-40» – бортовой радиолокационной станции «Гроза-40», имеющей данные: рабочая частота – 9370 МГц; частота следования импульсов – 400 Гц; длительность импульса – 2 мкс; – излучаемая импульсная мощность – не менее 10 кВт; потребляемая мощность – 400 Вт; антенна направлена по направлению полета.  
– РЛС БМР – бортового метеорологического локатора, изготовленного в ЦАО на основе РЛС РОС-1: рабочая частота –  $9320 \pm 30$  МГц; частота следования импульсов –  $400 \pm 28$  Гц; длительность импульса –  $2 \pm 0,1$  мкс; – излучаемая импульсная мощность – 60 кВт; чувствительность приемника – 90 мВ/мВт; потребляемая мощность – 500 Вт; антенна направлена вертикально вниз, позволяет получать радиолокационные сечения облака по направлению полета.

б) комплекс приборов для измерения вектора напряженности электрического поля

СПНП – 4 самолетных прибора для измерения напряженности электрического поля верхним (ДВ), нижним (ДН), боковым (ДБ) и кильевым (ДК) датчиками. Диапазоны измерения:  $\pm 500$  В/м;  $\pm 2500$  В/м;  $\pm 25000$  В/м;  $\pm 250000$  В/м; ошибка измерения – не более 5%.

Вектор напряженности электрического поля в орто-гональной системе координат самолета (вертикальная, продольная и поперечная) рассчитываются по показаниям этих 4 датчиков.

с) комплекс приборов для измерения метеопараметров атмосферы

ГК – гирокомплекта для измерения углов крена и тангажа;

ПК – перегрузочного комплекта. Диапазоны измерения: перегрузки –  $\pm 1g$ ; угла тангажа –  $\pm 5^\circ$ ;

вертикальной скорости самолета –  $\pm 10$  м/с;

вертикальных порывов ветра –  $\pm 10$  м/с;

СЭМ – самолетного электрометеорографа. Данные измерения: давление воздуха –  $100 \div 1030$  мб  $\pm 2\%$ ;

температуры –  $70 \div 40^\circ\text{C} \pm 1\%$ ;

приборной воздушной скорости –  $100 \div 600$  км/ч;

### III. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ

Как отмечалось выше, верификация ЧМ может проводиться как на основных, обобщенных закономерностях развития процессов в облаке, установленных экспериментально и сформулированных в виде эмпирической модели, так и на результатах наблюдений процесса развития конкретного облака в конкретной атмосфере. Мы предполагаем использовать оба подхода. Верификацию развития облака на дрогозовой стадии будем проводить с использованием эмпирической модели развития процесса организованной электризации. Эта модель создана на основе экспериментальных самолетных исследований конвективных облаков в северо-западном регионе. Под организованной электризацией мы понимаем совокупность процессов микро- и макроэлектризации, в результате которых появляется электрическое поле вне облака [1, 9, 16]. Следовательно, это поле является интегральной и результирующей характеристикой не только процессов микро- и макроэлектризации, но и всей совокупности микрофизических и динамических процессов за время существования облака. В этом смысле мы считаем величину напряженности электрического поля над облаком, измеренную с помощью самолета-лаборатории, оптимальной характеристикой. Установленные в ЭМ закономерности изменения Е в процессе развития облака и связи Е с другими контролируемыми параметрами используются для верификации ЧМ.

Параметры облака контролировались при пролетах самолета над облаком прямым и обратным курсом с превышением 100–500 метров над вершиной. При изменении высоты облака соответственно менялась высота полета. В каждом эксперименте стремились исследовать весь цикл жизни облака – от зарождения (превышения вершины облака нулевой изотермы) до разрушения. Электризация облака контролировалась по напряженности электрического поля над облаком E; образование и перемещение крупных частиц в облаке и под ним контролировались по распределению радиолокационной отражаемости Z (радиолокационное сечение исследуемого облака по курсу пролета самолета), измеряемой либо самолетным, либо наземным радиолокаторами, либо обоими радиолокаторами; вероятность кристаллизации частиц контролировалась по температуре на высоте верхней границы облака  $H_{\text{вс}}$  и визуально по внешнему виду вершины [1, 9].

Для исследования выбирались изолированные, одиночековые, долгоживущие облака. В результате для каждого эксперимента (облака) с дискретностью 4–7 мин. мы получали серию измерений вышеперечисленных параметров исследуемого облака.

При анализе результатов удалось выделить неизвестные ранее общие закономерности развития электризации конвективных облаков, которые могут быть использованы для настройки параметров и верификации численных моделей.

Процесс электризации облака может начинаться, т.е. E над облаком увеличивается до 50–100 В/м и более, только тогда, когда в облаке появляются условия для роста крупных ледяных частиц (верхняя граница конвективного облака находится выше изотермы  $-8^\circ\text{C}$  (рис. 1, табл. 1), максимальная величина отражаемости под облаком (ниже уровня конденсации) ( $Z_{oc}$ ) по самолетному радиолокатору превышает 0 dBZ (табл. 1), толщина переохлажденной части облака ( $dH_{T<0}$ ) превышает 1,6 км (табл. 1).

Электризация облака наблюдается обязательно, если в вершине облака идет интенсивный процесс кристаллизации (образование крупных ледяных частиц), верхняя граница облака выше изотермы  $-22^{\circ}\text{C}$  (рис. 1, табл. 1), отражаемость осадков выше  $40 \text{ dBZ}$  (табл. 1), толщина переохлажденной части более  $2,6 \text{ км}$ . (табл. 1), визуальное состояние вершины свидетельствует об интенсивной кристаллизации вершины [1]. Для каждого из контролировавшихся параметров можно определить интервалы, при которых электризация в облаке отсутствует ( $E = 0$ ),  $E$  - напряженность поля может быть, а может и не быть ( $E = 0$  или  $1$ ), присутствует обязательно ( $E = 1$ ).

В табл. 1 приведены границы этих зон для «толщины» переохлажденной части  $dH\text{-km}$ , максимальной отражаемости во всем облаке  $Zcl \text{ dBZ}$ , максимальной отражаемости ниже уровня конденсации (осадки)  $Zr \text{ dBZ}$ , диаметра облака  $D \text{ км}$ , «толщины» облака  $dH \text{ km}$ , высоты верхней границы  $Htop \text{ km}$ , температуры атмосферы на уровне верхней границы  $Ttop \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На начальной стадии развития вертикальная составляющая  $E$  над облаком положительна, т.е. имеет то же направление, что и поле «хорошей погоды». Что характерно для облачного диполя с верхним отрицательным зарядом. На стадии зрелости и разрушения  $E$  обычно меняет знак на обратный, т.е. эквивалентный облачный диполь как бы переворачивается [1, 9].

Численная модель была модернизирована для проведения верификации на этой ЭМ. В частности был введен расчет вертикальной составляющей напряженности электрического поля на высоте 200 метров над уровнем верхней границы облака.

Модельный расчет двух облаков по соответствующим реальным аэрологическим зондировкам атмосферы показал следующие результаты.

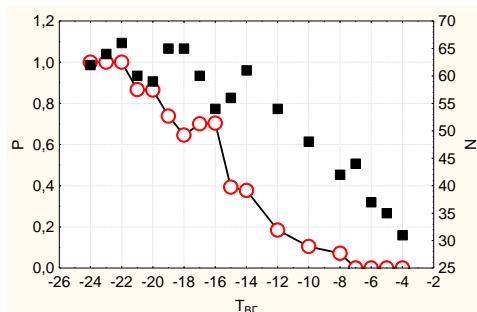


Рис. 1. Вероятность начала организованной электризации ( $P$ ) от температуры на уровне верхней границы облака ( $Tvg$ ) (красные кружки),  $N$  — количество рассмотренных случаев (черные квадратики)

Организованная электризация модельных облаков началась при следующих параметрах:

$$dH = 2,0/1,6 \text{ км}; D = 5,4/5,0 \text{ км}; dH = 4,2/4,7 \text{ км};$$

$$Htop = 5,5/5,7 \text{ км}; Ttop = -15,6/-8,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Соответственно, параметры 1-го облака/параметры 2-го облака. Как видим, параметры модельных облаков, при которых начинается организованная электризация, удовлетворяют требованиям ЭМ. Для имеющихся двух случаев все параметры попадают либо в интервал второго столбца табл. 1 ( $E = 0$  или  $1$ ), либо третьего ( $E = 1$ ).

С верификацией аномального знака вертикальной составляющей  $E$  над облаком на начальном этапе организованной электризации с возможностью «переворота» поля при развитии облака дело обстоит сложнее. В обоих облаках моделируется многослойная зарядовая структура. В результате действия этих слоев над облаком 1 наблюдаются отрицательные значения  $E$ , т.е. обычно наблюдаемые над грозовыми облаками и противоположные по знаку ЭМ. Над модельным облаком 2, наоборот, направление вертикальной составляющей  $E$  положительно, совпадает по направлению с полем «хорошей погоды». Но «переворота поля», т.е. изменения знака вертикальной составляющей в процессе развития не наблюдалось ни в одном из двух модельных облаков. В то же время сложность и многослойность моделируемой зарядовой структуры и ее существенная изменчивость в процессе развития облака показывают, что параметризации модели достигли значительного уровня сложности, позволяющего моделировать нетривиальные особенности процессов организованной электризации.

Наряду с условиями начала процесса организованной электризации, важным этапом в развитии облака в целом и процессов электризации в частности, является переход облака в грозовое состояние. Этот этап характеризуется не только резким возрастанием опасности облака, но и существенным изменением физики всех процессов в облаке – осадкообразования, динамики, электризации и др.

Вопросы инициации молний и необходимых и достаточных для этого условий являются малоизученными [24–27].

ТАБЛИЦА 1. ГРАНИЧНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

Параметры	$E = 0$	$E = 0$ или $1$	$E = 1$
$dH\text{-km}$	$< 1.6$	$> 1.6$ $< 2.6$	$> 2.6$
$Zcl \text{ dBZ}$	$< 10$	$> 10$ $< 40$	$> 40$
$Zr \text{ dBZ}$	$< 0$	$> 0$ $< 40$ $> 40$	
$D \text{ км}$	$< 3$	$> 3$ $< 6$ $> 6$	
$dH \text{ km}$	$< 2.0$	$> 2.0$ $< 3.2$	$> 3.2$
$Htop \text{ km}$	$< 3.2$	$> 3.2$ $< 4.6$	$> 4.6$
$Ttop \text{ }^{\circ}\text{C}$	$> -8$	$< -8$ $> -22$	$< -22$

Исходя из тезиса, что спусковым механизмом инициации молний является достижение определенных «пробойных» значений напряженности электрического поля внутри облака, в модели ГГО принято, что как только в какой-либо точке облака напряженность электрического поля превысит  $100\ 000...800\ 000 \text{ В/м}$  в облаке происходит молниевый разряд. При этом все объемные заряды уменьшаются на  $20...80\%$ . Такая простая модель молниевого разряда позволяет исследовать условия перехода модельного облака в грозовое состояние и сравнивать их с реально наблюдаемыми в экспериментах.

В недавнем прошлом модельные и реальные облака сравнивались обычно по максимальным значениям тех, или иных параметров, наблюдаемых за весь цикл существования облака. Представляется, что на современном этапе развития численного моделирования для нестационарных моделей важно синхронизировать процессы

развития модельного и реального облаков. Отсчет времени в модельном облаке ведется обычно от времени возникновения «перегрева». Для реальных облаков в качестве точки отсчета используется время фиксации облака радиолокатором или другим дистанционным радиофизическим средством. Практика наших исследований показывает, что реальные облака обычно фиксируются метеорологическим локатором в момент начала организованной электризации, при  $T_{top} = -8 \dots -12^{\circ}\text{C}$ ;  $dH = 1,4 \dots 1,6 \text{ км}$ . Время достижения указанными параметрами этих значений рекомендуется принимать за точку отсчета и для модельного, и для реального облака.

Важное значение имеет также такой параметр, как частота молний. Этот параметр характеризует мощность механизмов организованной электризации, которая определяется всей совокупностью микрофизических, динамических и электрических процессов в данном облаке на данной стадии его развития. И, следовательно, является универсальным, интегральным параметром, отражающим не только мощность облака как генератора электричества, но и общую мощность процессов в облаке, как степень его потенциальной опасности.

Если вернуться к анализу 2-х модельных облаков на данных самолетной ЭМ, можно заметить, что молниевая активность модельных облаков началась при следующих параметрах:

$$dH = 4,2/2,4 \text{ км}; D = 6,2/5,0 \text{ км}; dH = 6,2/6,6 \text{ км};$$

$$H_{top} = 7,5/7,5 \text{ км}; T_{top} = -31,8/-23,2^{\circ}\text{C}$$

Сравнивая эти значения с данными табл. 1, можно отметить, что первые молниевые разряды появились в модельных облаках на стадии, когда по данным ЭМ в этих облаках наблюдалась 100 % вероятности организованной электризации. Таким образом можно констатировать, что результаты моделирования облаков №1 и №2 не противоречат эмпирической модели электризации конвективных облаков по результатам самолетных исследований.

Вторым используемым подходом к верификации является сравнение параметров конкретного облака с его модельным аналогом. Выполнено детальное исследование развития грозо-градового облака развивавшегося вблизи города Санкт-Петербург 22.07.2017. Из облака выпадали очень интенсивные осадки, которые привели к подтоплению двух районов города. Информация о характеристиках облака и молний получена с использованием дистанционных средств измерений: доплеровского поляризационного радиолокатора, грозопеленгационных систем «Blitzortung» и «Алвес» и радиометра.

Высота верхней границы развивающегося Cu cong по радиолокационным данным составляла 4,7 км в “0” момент времени. На 24 минуте облако было обнаружено по измерениям со спутника «Meteosat». На 30 минуте облако перешло в кучево-дождовую стадию. К 80 мин в облаке сформировалась одна зона высокой отражаемости, связанная с выпадающими осадками. Ее ширина составляла 10 км. Верхняя граница облака превысила 8 км по данным измерений со спутника. Максимальная отражаемость фиксировалась вблизи нижней границы и была равна 56,5 dBZ, что было обусловлено наличием града. В это время с помощью ГПС «Blitzortung» было впервые зафиксировано два электрических разряда в облаке. ГПС «Алвес» зафиксировала первый разряд на 70 минуте. Максимальная вы-

сота верхней границы по радиолокационным измерениям была равна 13,5 км и была зафиксирована на 220 минуте развития, в это время по измерениям со спутника она была равна 8,9 км. Верхняя граница облака по радиолокационным данным заметно превосходит рассчитанную по данным радиационных измерений. На 190 минуте развития отмечался максимум в частоте разрядов, зафиксированный обеими грозопеленгационными системами. Максимальная частота электрических разрядов отмечалась в период зрелой стадии развития. Она по данным грозопеленгационных систем «Blitzortung» и «Алвес» была равна соответственно 7,9 и 21,3 мин<sup>-1</sup>. Продолжались ливневые осадки, интенсивность которых составляла 82 мм/час по радиолокационным данным и 43,9 мм/час по данным измерений со спутника. Интенсивность осадков начала снижаться, присутствовала жидкая и ледяная фазы в облаке, градовые частицы, продолжалось увеличение размеров наковальни. Температура на верхней границе облака была равна -47,0°C.

Максимальная отражаемость в этот момент времени была равна 57 dBZ, а верхняя граница располагалась на высоте 8,7 км ( $T = -47,0^{\circ}\text{C}$ ) по измерениям со спутника. На 230 минуте были зарегистрированы последние разряды обеими ГПС. В рассматриваемом облаке появление электрических разрядов произошло значительно позже, чем можно было ожидать. Уже на 30 минуте развития были зарегистрированы частицы града, которые далее фиксировались на каждом скане радиолокатора. Отметим, что в период 30-70 минуты максимальная интенсивность осадков не превосходила 30 мм/час, она увеличилась скачком на 80 минуте, составляя здесь 77 мм/час по радиолокационным измерениям. Таким образом, на 80 минуте произошло существенное усиление осадков,

Было проведено моделирование по дневной зондировке 22.07.21. Моделируемое облако появляется в расчетной области на 26 минуте расчета. После появления облака высота его верхней границы достаточно быстро увеличивается и к 41 мин (через 15 мин после начала развития облака) составляет 6,1 км. Максимальные значения высоты верхней границы развивающегося облака составило 11,5 км на 53 мин. К окончанию расчета (100 мин) значение высоты верхней границы составило 8,3 км. Интенсивность жидких, твердых и суммарных осадков у поверхности земли рассматривалась отдельно. Динамика изменения всех трех рассматриваемых характеристик интенсивности осадков очень близка. Осадки начинаются выпадать из облака на 40 мин расчета и их интенсивность начинает стремительно увеличиваться, начиная с 46 мин расчета – после начала электрических разрядов. Максимумы интенсивности осадков достигаются на 50-51 мин расчета: сначала достигается максимум интенсивности жидких осадков  $I_r = 215 \text{ мм/ч}$  (50 мин), затем максимум интенсивности суммарных осадков  $I_{sum} = 302 \text{ мм/ч}$  (50 мин), и последним достигается максимум интенсивности выпадения града  $I_i = 101 \text{ мм/ч}$  (51 мин). Во время достижения указанных максимумов высота верхней границы облака составляет 10,1-10,5 км, восходящие токи – 17,4 м/с. После достижения абсолютных максимумов наблюдается уменьшение интенсивности осадков, а затем небольшой локальный максимум  $I_r$  (188 мм/ч),  $I_i$  (71 мм/ч) и  $I_{sum}$  (251 мм/ч) на 60 мин. Далее интенсивность осадков снова уменьшается. К моменту окончания расчета осадки из облака продолжались:  $I_r = 43 \text{ мм/ч}$ ,  $I_i = 4 \text{ мм/ч}$ ,  $I_{sum} = 46 \text{ мм/ч}$ .

Электрические разряды в облаке начинаются на 44 мин расчета. Всего за время развития облака по результатам моделирования было зарегистрировано 36 электрических разрядов. Первый электрический разряд в облаке зафиксирован на 44 минуте расчета. Наибольшая частота разрядов  $f$ , осредненная для интервалов 10 мин, была равна  $0,8 \text{ мин}^{-1}$  и соответствовала периоду 50-60 мин. К периоду окончания расчета (100 мин) частота разрядов уменьшается до  $0,4 \text{ мин}^{-1}$ .

Сравнение реального и модельного облака показало, что они различаются достаточно существенно. Высота модельного облака превышает высоту реального почти на 2 км, максимальная частота молниевых разрядов различается в 10...20 раз, время существования реального облака более чем в 2 раза больше, чем модельного. Возможными причинами полученных различий может быть наблюдавшийся в реальности процесс слияния ячеек, обычно приводящий к интенсификации облачных процессов.

## VI. ВЫВОДЫ

Рассмотрены вопросы верификации трехмерной нестационарной численной модели конвективного облака на результатах экспериментальных исследований облаков в Северо-Западном регионе.

В качестве основных сравниваемых характеристик предложены параметры, характеризующие электрическое состояние облака – напряженность электрического поля над облаком на дождевой стадии развития и частота молний на грозовой стадии.

Проведена верификация двух модельных облаков на результатах эмпирической модели, созданной на результатах самолетных исследований электризации, показавшая хорошее совпадение условий начала организованной электризации модельных облаков и эмпирической модели.

Проведена верификация нестационарной численной модели конвективного облака с параметризованной микрометеорологической на данных экспериментального исследования грозо-градового облака, развивавшегося в районе Санкт-Петербурга 22.07.2017. Выявлены значительные различия.

## ЛИТЕРАТУРА

- Михайловский Ю.П. Эмпирическая модель электрически активных конвективных облаков и возможности ее использования для тестирования численной модели // Труды ГГО. – 2003. – № 552. – С. 66-75.
- Schuur T.J., Rutledge S.A. Electrification of Stratiform Regions in Mesoscale Convective Systems // J. of At. Sci. – 2000. – Vol 57, No. 13. – P. 1961-19811.
- Stolzenburg M., Rust W.D. and Marshall T.C. Electrical Structure in Thunderstorm Convective Regions. J.Geoph. Res. – 1998. 103,14,097. – DOI:10.1029/97JD03545.
- MacGorman D.R., Rust W.D. The electrical nature of storms. – Oxford University Press, New York. 1998. – 534 p.
- Sin'kevich A., Dovgaluk Y., Kurov A., Mikhailovskii Y., Toropova M., Veremei N., Boe B., Pawar S., Gopalakrishnan V., Yang J., Abshaev A., Gekkiева J. Investigation of thundercloud features in different regions. Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, No. 16.
- Saunders C. Charge separation mechanisms in clouds // Space Sci Rev. – 2008. – Vol. 137. – P. 335-353. Dwyer J.R. & Uman M.A. The physics of lightning // Phys. Rep. – 2014. – 534. – P. 147-241.
- Имянитов Н.М., Чубарина Е.В., Шварц Я.М. Электричество облаков. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1971. – 96 с.
- Кашleva L.B., Михайловский Ю.П., Михайловский В.Ю. Механизмы электризации облачных гидрометеоров в грозовых облаках // Ученые записки Российской государственной гидрометеорологической университета. – 2016. – № 45. – С. 119-131.
- Михайловский Ю.П. Эмпирическая модель электрически активных конвективных облаков и возможности ее использования для тестирования численной модели // Труды ГГО. – 2003. – № 552. – С. 66-75.
- Futyan J.M., Del Genio A.D. Relationships between lightning and properties of convective cloud clusters // Geophys. Res. Lett. – 2007. – Vol. 34.. L15705. 2007. – P. 1-5.
- Liu C., Cecil D. J., Zipser E. J. et al. Relationships between lightning flash rates and radar reflectivity vertical structures in thunderstorms over the tropics and subtropics // J. Geophys. Res. – 2012. – Vol. 117. D06104.
- Михайловский Ю.П., Син'кеевич А.А., Абшаев А.М., Торопова М.Л., Геккиева Ж.М., Кашилева Л.В., Павар С.Д., Гопалакришнан В. Радиолокационные параметры облаков при переходе в грозовую стадию // Распространение радиоволн: Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции. – Калининград, 2021. – С. 740-745.
- Pessi A.T., Businger S. Relationships among lightning, precipitation, and hydrometeor characteristics over the North Pacific Ocean // J. Appl. Meteorol. Climatol. – 2009. – Vol. 48, No. 4. – P. 833-848.
- Син'кеевич А.А., Попов В.Б., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Старых Д.С. Характеристики кучево-дождевого облака с водяным смерчем над ладожским озером по данным дистанционных измерений // Оптика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 33, № 2. – С. 153-158.
- Qie X.S., Zhang Y., Yuan T., Zhang Q., Zhang T., Zhu B., Lu W., Ma M., Yang J., Zhou Y. and Feng G. A review of atmospheric electricity research in China // Adv. Atmos. Sci. – 2015. – 32 (2). – P. 169-191. – DOI: 10.1007/s00376-014-0003-z.
- Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Син'кеевич А.А., Янг Дж., Лу Дж. Динамика электрической структуры грозоградового кучево-дождевого облака // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 5. – С. 341-353.
- Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Син'кеевич А.А., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л. Исследование динамики электрической структуры грозоградового кучево-дождевого облака по данным трехмерного численного моделирования (на примере северо-запада России) // Труды ГГО. – 2019. – № 592. – С. 7-22.
- Pawar S. D., Murugavel P., Gopalakrishnan V. Anomalous electric field changes and high flash rate beneath a thunderstorm in northeast India // Journal of Earth System Science. – 2010. – 119 (5). – P. 617-625. DOI 10.1007/s12040-010-0040-7.
- Син'кеевич А.А., Попов В.Б., Тарабукин И.А., Дорофеев Е.В., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Михайловский Ю.П., Снегуров В.С., Снегуров А.В. Изменения характеристик конвективных облаков и выпадающих осадков при слиянии облаков // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 8. – С. 19-32.
- Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Михайловский Ю.П. и др. Исследование особенностей развития процессов электризации и градообразования в суперяжиковом облаке дистанционными радиофизическими средствами // Труды ГГО. – 2020. – Вып. 596. – С. 96-130.
- Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Син'кеевич А.А., Михайловский Ю.П., Попов В.Б. Численное моделирование эволюции грозоградового конвективного облака, его электрической структуры и связанных с ним опасных явлений на северо-западе России // Труды ГГО. – 2018. – № 590. – С. 7-26.
- Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Морозов В.Н. О параметризации микрофизических процессов в численных моделях грозовых облаков // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 11. – С. 5-18.
- Снегуров А.В., Снегуров В.С. Система местоопределения гроз // Труды ГГО. – 2017. – Вып. 586. – С. 117-140.
- Syssoev A., Iudin D., Karashtin A. & Shlyugaev Y. Radiation electric field produced by the lightning leader formation in a thundercloud: Observations and modeling // J. Atmos. Solar Terr. Phys. – 2021. – 221. – 105686.
- Dwyer J.R. & Uman M.A. The physics of lightning // Phys. Rep. – 2014. – 534 – P. 147-241.
- Син'кеевич А.А., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Попов В.Б., Старых Д.С., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е. Строение грозового облака со смерчем и зависимость частоты молний от его характеристик // Оптика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 33, № 9. – С. 705-709.
- Михайловский Ю.П., Зайнетдинов Б.Г., Син'кеевич А.А., Pawar S.D., Торопова М.Л., Куроев А.Б., Gopalakrishnan V. Об эффективности контроля электрического состояния облаков дистанционными радиофизическими средствами в ближней зоне // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35, № 3 (398). – С. 205-211.

# Атмосферная турбулентность и потери света при спектроскопии астрономических объектов

**Закинян Артур Робертович**

Кафедра теоретической и математической физики,  
Физико-технический факультет, Северо-Кавказский  
федеральный университет  
г. Ставрополь, Россия  
*azakinian@ncfu.ru*

**Панчук Ася Владимировна**

Специальная астрофизическая обсерватория  
Российской академии наук (САО РАН)  
п. Нижний Архыз, Россия  
*panchukasya@gmail.com*

**Аннотация.** Потери света при спектроскопии звёзд определяются величиной спектрального разрешения, диаметром телескопа и угловыми размерами турбулентного диска изображения звезды. Влияние турбулентности на изображения, формируемые в телескопах разного диаметра, различно. Ценность поиска места для обсерватории, проведенная в отдельные сезоны на телескопах малых диаметров, невелика.

**Abstract.** The loss of light during spectroscopy of stars is determined by the magnitude of the spectral resolution, the diameter of the telescope and the angular dimensions of the turbulent disk of the star image. The effect of turbulence on images formed in telescopes of different diameters is different. The value of finding a place for an observatory, carried out in certain seasons on telescopes of small diameters, is small.

**Ключевые слова:** атмосферная турбулентность, спектры высокого разрешения, потери света на входе спектрографа.

**Keywords:** atmospheric turbulence, high-resolution spectra, light loss at the entrance of the spectrograph.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема эффективности наземных оптических телескопов определяется местом установки последних и астрофизическими задачами, которые предполагается решать в течение десятилетий. Выбор места установки большого дорогостоящего телескопа не всегда определяется соображениями чисто астроклиматического характера (число ясных ночей, средние угловые размеры изображений звёзд), присутствуют и другие факторы (стоимость прокладки новых коммуникаций, прогноз экономического потенциала региона, определяющего урбанистическую подсветку ночного неба, и т.п.). Развитие техники регистрации оптического излучения увеличивает долю научных программ, выполняемых методами спектроскопии высокого разрешения. Здесь появляется новый тип потерь – потери на входе спектрографа, определяемые как состоянием атмосферы, так и предельными достижениями оптических технологий.

## II. ПРОБЛЕМА ШИРОКОЩЕЛЬНОСТИ СПЕКТРОГРАФА

В бесщелевой спектроскопии (простейший пример – линзовая камера с предобъективной призмой), потерь света на входе спектрографа не происходит, т.к. полоска спектра формируется совокупностью монохроматических изображений звёзды. Но при увеличении угловых размеров изображения звезды (или в результате некаче-

ственной компенсации видимого движения звёздного неба), в бесщелевом спектрографе снижается спектральное разрешение  $R = \lambda/\delta\lambda$ , где  $\delta\lambda$  определяется угловой дисперсией призмы и угловым диаметром турбулентного изображения звезды. Поэтому бесщелевые спектры использовались только в целях массовой спектральной классификации звёзд, где требования к  $R$  невелики.

В щелевой спектроскопии уровень потерь света возрастает с увеличением диаметра объектива телескопа  $D$  и с увеличением необходимого спектрального разрешения. Покажем это на оценках, выполненных для двух телескопов, с диаметром объективов  $D_1 = 6$  м и  $D_2 = 1$  м. Пусть на обоих телескопах необходимо получить одну и ту же величину спектрального разрешения, например,  $R = 10^4$ . Вначале рассмотрим один и тот же спектрограф, соединяемый с первым или вторым телескопом. Спектрограф считается согласованным с телескопом, если реализуется спектральное разрешение, определяемое свойствами светоприемника. Пусть линейное разрешение определяется шириной двух пикселей матрицы ПЗС. Например, для матрицы с размером пикселя  $15 \times 15$  мкм линейное разрешение составит  $l_{CCD} = 0,03$  мм. На эти два пикселя должна укладываться проекция ширины входной щели спектрографа. Для определения ширины  $s$  такой щели используется фактор широкощельности – отношение фокусных расстояний коллиматора и камеры,  $F_{coll}/F_{cam}$ . С точностью до второстепенного фактора увеличения на дифракционной решётке спектрографа, фактор широкощельности определяет ширину щели,  $s/l_{CCD} = F_{coll}/F_{cam}$ , согласованной с линейным разрешением приемника. Подавляющее большинство астрономических спектрографов построено по схемам, существенно уменьшающим изображение входной щели ( $F_{coll} > F_{cam}$ ). Масштаб изображения зависит от фокусного расстояния  $F_{tel}$  объектива (главного зеркала) телескопа, и равен  $l = F_{tel}\alpha$ , если угловые размеры изображения  $\alpha$  измерены в радианах, (см. стр.201-202 в [1]).

Для телескопа БТА ( $D_1 = 6$  м) при относительном отверстии в фокусе Нэсмита 1: 30,74 [2], эквивалентное фокусное расстояние  $F_{tel} = 184,44$  м, и масштаб изображения составляет 1,12 угловой секунды в 1 мм. Среднее качество изображений на БТА, измеренное цифровыми методами, составляет 1,67 угловой секунды [3]. Если ширина входной щели составляет 1 угл.сек. (т.е. 0,89 мм), то для согласования с элементом разрешения приемника (0,03 мм) необходимо обеспечить фактор

широкощельности  $F_{\text{coll}}/F_{\text{cam}} = 30$ , что является недостижимой величиной, из-за технологических ограничений на габариты нарезных дифракционных решеток (или их реплик). Действительно, при размере заштрихованной части реплик дифракционных решеток ( $360 \times 320 \text{ мм}^2$ ) Основного звёздного спектрографа (ОЗСП) БТА [4], такими решетками удается перехватить весь коллимированный пучок,  $d_{\text{coll}} = 258 \text{ мм}$ . Фокусное расстояние коллиматора ( $F_{\text{coll}} = 7928,7 \text{ мм}$ ) ограничено конструкцией БТА (конструкция ОЗСП занимает все 4 этажа одной из опор телескопа), фокусное расстояние камеры  $F_{\text{cam}} = 604 \text{ мм}$  ограничено предельным значением относительного отверстия ( $d_{\text{coll}}/F_{\text{cam}} = 1:2,3$ ), при котором ещё обеспечивается высокое качество спектра по всему полю изображений. Итак, фактор широкощельности ОЗСП составляет  $F_{\text{coll}}/F_{\text{cam}} = 13,1$ , что является предельным значением для спектральной аппаратуры высокого разрешения, установленной на БТА. При этом ширина щели, согласованная с линейным разрешением приемника, составляет всего  $0,03 \times 13,1 = 0,39 \text{ мм}$ , или  $0,44 \text{ угл. сек.}$ . При работе во втором порядке решетки 600 штрихов/мм обратная линейная дисперсия ОЗСП составляет  $13,2 \text{ \AA/mm}$ , или  $0,4 \text{ \AA}$  на двухпиксельный элемент разрешения приемника, чем для  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$  обеспечивается  $R = 5000/0,4 = 12500$ . Итак, высокое спектральное разрешение ( $R > 10000$ ) на 6-метровом телескопе можно реализовать только при условии значительных потерь света на щели (более  $2/3$  при изображениях  $\sim 1.5 \text{ угл. сек.}$ ). На рис. 1 качественно эта ситуация иллюстрируется случаем «*a*».

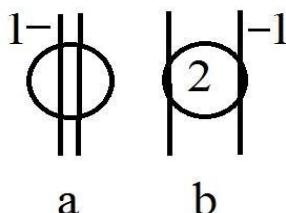


Рис. 1. Соотношение ширины щели спектрографа (1) и диаметра изображения звезды (2). Случай «*a*» – в щель попадает центральная часть изображения, сегменты которого отражаются от щечек щели, случай «*b*» – практически все изображение «проваливается» в щель, и контроль положения изображения звезды на щели осуществляется по слабому ореолу, формируемому в турбулентной атмосфере

Рассмотрим вариант наблюдений на телескопе  $D_2 = 1 \text{ м}$ . Если предположить, что в помещении фокуса кудэ можно разместить спектрограф, повторяющий параметры ОЗСП, то потери света можно оценить по величине масштаба изображения на щели. Относительное отверстие 1-метрового телескопа САО РАН в фокусе кудэ составляет 1:36,5 [5], т.е. масштаб изображения на щели спектрографа равен  $5,66 \text{ угл. сек. в мм}$ . При ширине щели  $0,39 \text{ мм}$  будут полностью использоваться изображения звезд диаметром до  $2,2 \text{ угл. сек.}$  (случай «*b*» на рис. 1). В действительности на 1-метровом телескопе в фокусе кудэ установлен спектрограф с меньшим значением диаметра коллимированного пучка. Не прибегая к выводу точного соотношения (подробнее см. в [6]), отметим только, что спектральное разрешение  $R$  пропорционально диаметру коллимированного пучка  $d_{\text{coll}}$ , и обратно пропорционально диаметру телескопа  $D$  и ширине щели  $s$ , выраженной в угловой мере, ( $R \sim d_{\text{coll}}/sD$ ).

Итак, на телескопах большого диаметра спектроскопия высокого разрешения осуществляется со значительными потерями света. Снизить эти потери можно, увеличивая  $d_{\text{coll}}$ , (при фиксированном значении  $R$ ), и уменьшая угловые размеры изображения звезды  $\alpha$ , (т.о., снижая потери света на щели  $s$ , согласованной с линейным разрешением приемника).

### III. ПРОБЛЕМА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ

В фокусе наземного телескопа изображение звезды искажено атмосферными помехами. Выделяются следующие характеристики [7]: качество изображения звезды (КИЗ, т.е. вид дифракционной картины звезды), дрожание изображения звезды (ДИЗ), мерцание изображения звезды (МИЗ). При дрожании изображения звезда отклоняется от центра поля зрения во всех направлениях хаотично, но само изображение может быть четким, тогда как при плохом качестве изображение звезды размыто, хотя оно может и не дрожать. Причиной помех является неоднородность показателя преломления воздуха на пути распространения луча. Еще в середине века была получена связь между среднеквадратической флуктуацией угла прихода световых лучей  $\sigma$  и параметрами атмосферы [8]:

$$\sigma = 0,93(BPk/T^2)L^{1/2}D^{-1/6},$$

где  $B$  – характеристика поля температурных пульсаций,  $P$  – атмосферное давление,  $k$  – коэффициент связи пульсации диэлектрической постоянной с пульсацией температуры  $T$ ,  $L$  – путь, пройденный сигналом в турбулентном слое атмосферы,  $D$  – диаметр апертуры телескопа.

Была построена теория турбулентности температурно-неоднородной атмосферы [9]. По мере развития исследований дрожания изображений звезд, специалисты подошли к вопросу об установлении связи между турбулентными и оптическими параметрами атмосферы.

В случае плоской световой волны дисперсия величины дрожания изображения для объекта на зенитном расстоянии  $Z$ :

$$\sigma^2 = 2,84D^{-1/3} \sec Z \int C_n^2(H)dH$$

связана с  $C_n$  – структурной функцией неоднородностей коэффициента преломления в атмосфере, и высотой над земной поверхностью  $H$ . Величину  $C_n$  можно рассчитать, если известна структурная функция пульсации температуры  $C_T$ :

$$C_n = 7,8 * 10^{-6} P T^{-2} C_T.$$

Измерения  $C_T$  можно заменить использованием осредненных данных

$$C_T = 1,4H^{-1/3}(T_1 - T_2)[\ln(H_1/H_2)]^{-1},$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – средняя температура на уровнях  $H_1$  и  $H_2$  соответственно.

Теоретические исследования были подкреплены экспериментальными данными [10]. Как показали исследования атмосферы, выполненные в конце 60-х – начале 80-х годов прошлого столетия, основной вклад в КИЗ вносят, действительно, температурные неоднородности атмосферы.

Итак, была установлена связь между величиной деформации фронта световой волны, искаженным качеством изображения в фокусе экспедиционного телескопа небольшого диаметра  $D$  и метеорологическими параметрами. Отметим, что параметры качества изображения, искажаемого в турбулентной среде, зависят также и от размеров источника и приемника. Если угловые размеры источника малы (наблюдаем звезду), то остается зависимость от диаметра используемого телескопа.

Мерцания (вариации яркости) и дрожания изображений звезд, наблюдаемые в небольшой телескоп, определяются как состоянием атмосферы, так и соотношением характерного размера элемента турбулентности к диаметру объектива телескопа. Число элементов турбулентности, находящихся в пучке, перехватываемом объективом большого телескопа, возрастает. Поэтому при увеличении диаметра телескопа эффекты, наблюдаемые в небольшой телескоп (картина, формируемая дифракцией на объективе телескопа, мерцание и дрожание изображений), практически исчезают. Если при наблюдениях в телескоп большого диаметра приемник излучения значительно удалить от фокальной поверхности, то регистрируем картину изменений освещенности зрачка телескопа. На рис. 2 показано расфокусированное изображение звезды, полученное на телескопе БТА с диаметром объектива 6 метров.



*Рис. 2. Расфокусированное изображение звезды («мгновенный» снимок), полученное на телескопе с диаметром объектива 6 метров. Центральная часть зеркала экранируется кабиной первичного фокуса (ПФ) БТА. Тонкие радиальные линии – тень конструкции, удерживающей кабину ПФ*

Упрощенно такую картину можно объяснить как результат совокупного воздействия большого числа элементов турбулентности, каждый из которых работает как слабая воздушная линза, положительной или отрицательной силы. В зависимости от метеоусловий такая картина может меняться как с высокой частотой, так и значительное время быть «замороженной». Отсюда ясно, что экспедиционные наблюдения на малых телескопах имели ограниченную ценность для предсказания ситуации, которая будет наблюдаться в телескопе большого диаметра.

#### IV. ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общую картину астроклиматических исследований территории СССР можно найти в [7]. Но представления о качестве изображений, наблюдавшихся в телескопы небольшого диаметра в районе, где был установлен БТА, – сложились всего за несколько месяцев. В таблице 1 приведена сводка периодов исследований качества изображений, выполненных на территории Зеленчукского района Карачаево-

Черкесской автономной области (КЧАО). Эти исследования проводились по методике, разработанной в Главной астрономической обсерватории (ГАО) АН СССР. Использовались преимущественно телескопы АЗТ-9 ( $D = 140$  мм,  $F = 1985$  мм) и АЗТ-7 ( $D = 200$  мм,  $F = 2000$  мм). Работы, выполненные после принятия решения о пункте установки БТА, в табл. 1 не приведены.

ТАБЛИЦА 1. ПЕРИОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕДИЦИЙ В ЗЕЛЕНЧУКСКОМ РАЙОНЕ КЧАО ПО ИССЛЕДОВАНИЮ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Пункт	Высота (м)	Период
гора Джисса	1685	05.1961–09.1961
ст. Зеленчукская	950	08.1960–04.1961
с. Маруха	1200	05.1961–08.1961
«Звёздный»	2300	08.1961–10.1961
гора Семиродники	2280	06.1961–09.1961
гора Чапалы	1950	07.1961–09.1961
гора Чинар	1180	06.1961–10.1961

В постановлении Президиума АН СССР (декабрь 1960 г.) предписывалось представить к 1 октября 1961 г. сведения об окончательно выбранном пункте [11]. Если проект альт-азимутальной системы БТА не зависел от координат места установки, то при проектировании научного поселка, инфраструктуры и коммуникаций следовало учитывать местные условия, т.е., уже знать место установки телескопа. В начале 1962 г., на заседании Межведомственного совета был заслушан доклад Н.Н.Кучерова (ГАО АН СССР) и окончательно утверждено место установки БТА (высота 2070м в 25км к югу от станицы Зеленчукской). В популярной литературе утверждается, что выбор осуществлен по результатам работы 15 экспедиций (были исследованы районы и вершины Восточной Сибири, Средней Азии, Северного Кавказа, Крыма), причем фигурируют разные оценки продолжительности выбора места для БТА, от 5 до 10 лет. Процитируем работу [12], где приведены данные астроклиматических исследований Зеленчукской экспедиции ГАО АН СССР за 1960–1966 гг. В этой работе, в табл.1 указано, что «данные до мая 1961 г. относятся к пункту наблюдения ст. Зеленчукская». Итак, измерения в районе (пункт «Звездный»), где впоследствии был установлен БТА, проведенные до принятия решения о месте установки (начало 1962 г.), выполнялись всего около полугода, в летне-осенний период (!), и не являлись статистически репрезентативными. Наблюдения, продолженные после принятия решения о месте установки, решавшего значения уже не имели. Следует также отметить, что в период выбора места установки БТА, астроклиматические исследования, как самостоятельное научное направление, находились в процессе становления, и многие закономерности, известные сегодня, в то время не могли быть учтены. Представления о турбулентной структуре атмосферы, сформулированные в концепции Данжона-Кудэ [13], и положенные в основу методики выбора места для БТА, в дальнейшем не подтвердились.

#### V. Выводы

Продолжительность поисков места для установки БТА ограничивалась директивными условиями. Методика выбора места была основана на ошибочной теорети-

ческой концепции [13]. Недостаточная дискретизация шкалы оценок звездных изображений не позволила определиться с видом зависимости качества изображений от зенитного расстояния.

Предельная величина спектрального разрешения определяется технологическими ограничениями производства крупногабаритных дифракционных решеток. На телескопах большого диаметра эти ограничения определяют уровень потерь света на входе спектрографа. В спектроскопии высокого разрешения остались как небольшие резервы улучшения конструкции спектрографа (см. [14]), так и принципиальные меры по уменьшению (методами адаптивной оптики) углового диаметра турбулентного диска звезды  $\alpha$ , согласованного с шириной щели  $s$ . Первые шаги в этом направлении уже намечены [15].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кононович Э.В. и Мороз В.И. Общий курс астрономии. УРСС, Москва, 2001. – 542 с.
2. Лобачев М.В., Якухнова Л.Е. Оптическая схема телескопа БТА. // Астрофизические исследования. (Известия САО). – 1977. – Т. 9. – С. 99-107.
3. Panchuk V.E.; Afanas'ev V.L. Astroclimate of Northern Caucasus - Myths and reality // Astrophysical Bulletin. – 2011. – Vol. 66, Iss. 2. – P. 233-254.
4. Panchuk V.E., Chuntonov G.A., and Naidenov I.D. Main Stellar Spectrograph of the 6-Meter Telescope. Analysis, Reconstruction, and Operation // Astrophysical Bulletin. – 2014., – Vol. 69, No. 3. – P. 339-355.
5. <https://www.sao.ru/Doc-k8/Telescopes/small/descrip.html>.
6. Chaffee F.H., Jr. ; Schroeder D.J. Astronomical applications of echelle spectroscopy // Annual review of astronomy and astrophysics. – 1976. – Vol. 14. – P. 23-42.
7. Дарчия Ш.П. Об астрономическом климате СССР. – М.: Наука, 1985. – 175 с.
8. Красильников В.А. О влиянии пульсации коэффициента преломления в атмосфере на распространение ультракоротких радиоволн // Известия АН СССР. Серия геогр. и геофиз. – 1949. – Т. 13. – Вып. 1. – С. 33-57.
9. Татарский В.И. Теория флюктуационных явлений при распространении волн в турбулентной атмосфере. М., Изд. АН СССР, 1959. – 232 с.
10. Колчинский И.Г. Оптическая нестабильность земной атмосферы по наблюдениям звезд. – Киев: Наукова Думка, 1967. – 184 с.
11. Копылов И.М. Краткая история Специальной астрофизической обсерватории АН СССР (1960-1984) // В кн. «И.М.Копылов – полвека в астрофизике». Изд. САО РАН. Ред. Ю.Ю.Балега и В.Г.Ключкова. – 2003. – С. 8-100.
12. Васильев О.Б., Нелибин Н.Ф. Исследования качества астрономических изображений в месте установки БТА. // Астрофизические исследования (Известия САО). – 1970. – Т. 1. – С. 125-134.
13. Данжсон А., Кудэ А. Атмосферное волнение. // Астрономический журнал. – 1940. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 77-89.
14. Панчук В.Е., Ключкова В.Г., Юшкин М.В. Эшелле спектрограф высокого разрешения 6-метрового телескопа БТА. // Астрономический журнал. – 2017. – Т. 94, № 9. – С. 808-818.
15. Klochko V.G.; Sheldakova Yu.V.; Vlas'yuk V.V.; Kudryashov A.V. Improving the Efficiency of High-Resolution Spectroscopy on the 6-m Telescope Using Adaptive Optics Techniques. // Astrophysical Bulletin. – 2020. – Vol. 75, No. 4. – P. 468-481.

# Влияние аэрозольных частиц на глобальную электрическую цепь

**Морозов Владимир Николаевич**  
Отдел геофизического мониторинга  
и исследований  
Главная геофизическая обсерватория  
им. А.И. Воейкова  
Санкт-Петербург, Россия  
*vn.morozov@inbox.ru*

**Зайнетдинов Булат Гаянович**  
Отдел геофизического мониторинга  
и исследований  
Главная геофизическая обсерватория  
им. А.И. Воейкова  
Санкт-Петербург, Россия  
*bulatoss@yandex.ru*

**Занюков Владимир Владимирович**  
Отдел геофизического мониторинга  
и исследований  
Главная геофизическая обсерватория  
им. А.И. Воейкова  
Санкт-Петербург, Россия  
*vvzov@gmail.com*

**Аннотация.** В докладе рассматривается влияние аэрозольных частиц в областях хорошей погоды на глобальную электрическую цепь, когда генераторы электрического поля поддерживающие эту цепь не учитываются, а входят через граничное условие на нижней границе в виде задания величины потенциала ионосферы:  $\phi_\infty$ .

**Abstract.** The report considers the influence of aerosol particles in fair weather areas on the global electrical circuit, when the electric field generators supporting this circuit is not taken into account, but enter through the boundary condition at the lower boundary in the form of setting the ionospheric potential value:  $\phi_\infty$ .

**Ключевые слова:** Глобальная электрическая цепь, электрическое поле атмосферы, электропроводность воздуха, аэрозоль.

**Keywords:** Global electrical circuit, electric field of the atmosphere, electrical conductivity of air, aerosol.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Атмосферный аэрозоль это взвешенные твердые и жидкые частицы, которые имеют как естественное, так и антропогенное происхождение. Помимо загрязнения воздуха и воздействия на здоровье, атмосферные аэрозоли являются важным фактором воздействия на климат, особенно в отношении радиационного баланса атмосферы. В дополнение к рассеянию света в атмосфере, как в случае тумана или смога, они могут непосредственно рассеивать солнечное излучение обратно в космос и, следовательно, вызывать радиационное охлаждение. Кроме того, аэрозоли могут действовать как ядра конденсации, приводящие к образованию облаков. При этом, излучающие свойства облаков зависят от количества и типа аэрозоля.

Электрические характеристики атмосферы (ЭХА), такие как напряженность электрического поля атмосферы и электрическая проводимость воздуха, являются интегральными показателями как радиоактивного, так и аэрозольного загрязнения. В ряде работ российских и зарубежных исследователей рассматривалось влияние выбросов в атмосферу аэрозольных частиц и радиоактивных веществ на параметры глобальной электрической цепи [1–4]. Помимо теоретических оценок также на данную тему существует ряд экспериментальных работ [5].

## II. ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ (ГЭЦ) В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ГЭЦ

Глобальная электрическая цепь – это система электрических токов, возникающая в атмосфере и пронизывающая нижнюю атмосферу, ионосферу и магнитосферу. Данные многолетних измерений электрических характеристик атмосферы указывают на существование электрического поля с напряженностью порядка  $10^2$  В/м и электрического тока с плотностью  $2 \cdot 10^{-12}$  А/м<sup>2</sup>. Эти параметры определяются в так называемых условиях «хорошей погоды», т.е. при отсутствии в данном районе Земли облаков, ветров, метелей и прочих метеорологических явлений. Поскольку земная атмосфера обладает электрической проводимостью, то при отсутствии источников (генераторов) электрического поля электрические поля должны были бы исчезнуть за время примерно равное 10 мин. Но этого не происходит и наблюдается квазистационарная картина электрического поля. Согласно современным представлениям основным источником электрического поля в тропосфере и стратосфере являются грозовые облака, действующие в экваториальной зоне земного шара. Грозовые облака действуют, как токовые генераторы. Наряду с этим типом генераторов определенную роль в создании временных суточных вариаций электрического поля атмосферы играют генераторы, действующие в верхних слоях атмосферы: магнитосферный генератор, возникающий при взаимодействии солнечного ветра с магнитным полем Земли, он создает горизонтальную разность потенциалов 40-100 кВ и электрический ток  $10^6$  А [6] и ионосферное динамо, возникающее вследствие солнечных и лунных приливов и которое поддерживает горизонтальную разность потенциалов 5-15 кВ между высокими низкими широтами, при этом электрический ток, даваемый этим генератором составляет  $10^5$  А [7].

Отметим, что в областях существования грозовых облаков наверх текут электрические токи, заряжающие атмосферу, а в областях, где грозовые облака отсутствуют текут токи разрядки

Основные уравнения, используемые для математического моделирования глобальной электрической цепи- это уравнения Максвелла:

$$\left\{ \begin{array}{l} rot \vec{E} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ rot \vec{H} = \frac{4\pi}{c} (\vec{j} + \vec{j}_s) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ div \vec{E} = 4\pi\rho \\ \vec{H} = 0 \\ \vec{j}_o = \lambda \vec{E} \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\vec{E}, \vec{H}$  – напряженности электрического и магнитного полей;  $\vec{j}_o, \vec{j}_s$  – плотности омического и стороннего электрических токов;  $\lambda$  – электрическая проводимость;  $\rho$  – плотность электрического заряда;  $c$  – скорость света.

Из второго уравнения этой системы следует выражение для сохранения плотности электрического заряда:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\vec{j} + \vec{j}_s) = 0. \quad (2)$$

При выполнении условий:  $T \gg L/c$ , где  $T$  – характерный временной масштаб рассматриваемых электрических процессов,  $L$  – характерный пространственный масштаб, система уравнений (1)-(2) сводится к следующей системе уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} rot \vec{E} = 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\vec{j} + \vec{j}_s) = 0. \\ div \vec{E} = 4\pi\rho \end{array} \right. \quad (3)$$

Данная система уравнений (3) описывает практически все электрические процессы в нижней атмосфере, исключая быстропеременные процессы, протекающие при молниевых разрядах.

Если выполнено условие:  $T \gg \frac{1}{4\pi\lambda} = \tau_\lambda$ , где  $\tau_\lambda$  – время электрической релаксации, то током смещения можно пренебречь и система уравнений (3) переходит к стационарному виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} rot \vec{E} = 0 \\ div(\vec{j} + \vec{j}_s) = 0. \\ div \vec{E} = 4\pi\rho \end{array} \right. \quad (4)$$

Поскольку электрическое поле потенциально, то можно ввести потенциал электрического поля  $\varphi$ , который связан с напряженностью электрического поля соотношением:  $\vec{E} = -grad\varphi = -\nabla\varphi$ . Используя это соотношение, получим соответствующие уравнения для определения потенциала электрического поля в нестационарном и стационарном случаях:

$$\frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \Delta\varphi + div(\lambda\nabla\varphi) = \sum_{s=1}^N div \vec{j}_s. \quad (5)$$

$$div(\lambda\nabla\varphi) = \sum_{s=1}^N div \vec{j}_s. \quad (6)$$

Здесь в правых частях уравнений записаны выражения учитывающие суммарное действие грозовых генераторов. Уравнения (5) и (6) вместе с соответствующими начальными и граничными условиями являются основными уравнениями, используемыми при моделировании глобальной электрической цепи. В частности, для стационарной (квазистационарной) задачи используются следующие граничные условия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi|_{r=R} = 0 \\ \varphi|_{r=R+H} = \varphi_\infty \end{array} \right. \quad (7)$$

где  $R$  – радиус Земли,  $R+H$  – радиус ионосферы,  $\varphi_\infty$  – потенциал ионосферы.

Обычно при модельных расчетах предполагается, что электрическая проводимость представляется выражением [8]:

$$\lambda(r) = \lambda_0 e^{\alpha(r-R)}. \quad (8)$$

где  $\alpha = (0,2 - 0,3) \text{ км}^{-1}$ .

Основными параметрами, определяющими глобальное электрическое состояние являются потенциал ионосферы  $\varphi_\infty$ , определяемый балансом электрических токов зарядки от грозовых облаков и токов разрядки, текущих в областях «хорошей погоды». Его величина составляет 250-300 кВ. Другим параметром является общее сопротивление атмосферы  $\hat{R}$ , определяемое выражением:

$$\hat{R} = \frac{1}{4\pi R^2} \int_R^{R+H} \frac{dr}{\lambda(r)}. \quad (9)$$

Его величина составляет 230 Ом, полный электрический ток в атмосфере 1000 А. Число гроз, действующих в данный момент времени по всему земному шару равно 2000 [8]. Кроме того глобальную электрическую цепь можно характеризовать некоторой емкостью  $C$ , равной 2.9 Ф и временной постоянной  $\tau = RC = 10$  мин, которая определяет время разрядки глобальной цепи в отсутствии генераторов.

Возникает вопрос: почему грозовые облака можно рассматривать, как генераторы электрического поля атмосферы? Это обусловлено двумя причинами: ростом электрической проводимости атмосферы с высотой и полярностью грозовых облаков в квазистационарной стадии их развития, когда верхняя часть грозового облака имеет положительный электрический заряд, а нижняя – отрицательный заряд. Математически эта задача основана на решении уравнения (6) в области, где грозовых облаков нет и в области, где они присутствуют. В области, где грозовые источники отсутствуют для атмосферы с экспоненциальной электрической проводимостью (8) получим выражение для потенциала электрического поля атмосферы:

$$\varphi(r) = \varphi_\infty \frac{1 - e^{-\alpha(r-R)}}{1 - e^{-\alpha H}}. \quad (10)$$

где  $H$  – высота ионосферы. При  $H = 80$  км  $\alpha H \gg 1$  вместо (10) имеем:

$$\varphi(r) = \varphi_\infty 1 - e^{-\alpha(r-R)}. \quad (11)$$

Плотность тока разрядки, возникающего под действием этого поля равна:

$$j_p = \lambda(r) E_r(r) = -\lambda(r) \frac{d\varphi(r)}{dr} = -\alpha \varphi_\infty \lambda_0. \quad (12)$$

С другой стороны, для дипольной модели грозового облака можно получить выражение для потенциала электрического поля, создаваемого электрическими зарядами облака [8]:

$$\varphi(\vec{r}) = q_{i+} e^{-\frac{\alpha}{2}(z-z_{i+})} \left[ \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho_{i+}}}{\rho_{i+}} - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho'_{i+}}}{\rho'_{i+}} \right] + q_{i-} e^{-\frac{\alpha}{2}(z-z_{i-})} \left[ \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho_{i-}}}{\rho_{i-}} - \frac{e^{-\frac{\alpha}{2}\rho'_{i-}}}{\rho'_{i-}} \right]. \quad (13)$$

Здесь:  $\rho_{i+} = \sqrt{r^2 + (z - z_{i+})^2}$ ,  $\rho_{i-} = \sqrt{r^2 + (z - z_{i-})^2}$ ,  $\rho'_{i+}, \rho'_{i-}$  – расстояния от зарядов-изображений;  $q_{i+}, q_{i-}$  – положительный и отрицательный заряды  $i$ -го источника;  $z$  – расстояние до центра грозового облака;  $z_{i+}, z_{i-}$  – расстояния до положительного и отрицательного зарядов. Выражение (13) получено в цилиндрической системе координат.

Используя это выражение можно получить выражение для тока, который течет от двух зарядов в верхние слои атмосферы:

$$I_{3i} = \int_0^\infty \lambda E_z 2\pi r dr = I_i \lambda_0 \left( \frac{1}{\lambda_{i-}} - \frac{1}{\lambda_{i+}} \right). \quad (14)$$

где  $I_i = 4\pi q_{i+} \lambda(z_{i+}) = 4\pi q_{i-} \lambda(z_{i-})$  – ток  $i$ -го источника.

Из соотношения:

$$I_p = 4\pi q_{i+} |j_p| = I_3 = \sum_{i=1}^N I_i \lambda_0 \left( \frac{1}{\lambda_{i-}} - \frac{1}{\lambda_{i+}} \right). \quad (15)$$

получим выражение для потенциала ионосферы, создаваемого грозами:

$$\varphi_\infty = \frac{1}{4\pi R^2 \alpha} \sum_{i=1}^N I_i \left( \frac{1}{\lambda_{i-}} - \frac{1}{\lambda_{i+}} \right) = \frac{1}{R^2 \alpha} \sum_{i=1}^N (|q_{i-}| - q_{i+}). \quad (16)$$

Электрический ток  $I_i$  есть ток электризации, который обычно возникает в облаке процессе его развития и обусловлен различными механизмами электризации [9]. При  $|q_{i-}| - q_{i+} = 150$  Кл для всех гроз,  $N = 2000$ , получим  $\varphi_\infty = 300$  кВ. Таким образом грозовая теория электрического поля атмосферы способна объяснить наблюдаемые значения электрических полей в атмосфере. Другие возможные модели описания электрических полей в атмосфере, основанные на грозовой теории, рассматриваются в справочнике [8].

Гелиокосмические влияния на глобальную электрическую цепь проявляются в двух аспектах: это изменения потенциала ионосферы на её нижней границе за счет действия магнитосферного и ионосферного генераторов, изменения электрической проводимости атмосферы за счет эффекта Форбуша [6] и изменения электрической проводимости атмосферы, вызванные вторжением солнечных космических лучей. Эти вопросы подробно изложены в работах [7, 10, 11].

### III. ВКЛАД СЛОЁВ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЭЦ

Как следует из результатов модельных расчетов основные электрические параметры ГЭЦ могут изменяться в процессе изменения числа и эволюции основных грозовых генераторов, расположенных в экваториальной зоне земного шара, это в частности приводит к суточной унитарной вариации электрического поля [12]. Кроме того, такие параметры, как плотность электрического тока, полный электрический ток в атмосфере, напряженность электрического поля, полное сопротивление и сопротивление в столбе атмосферы, а также потенциал ионосферы могут меняться при изменении электрической проводимости в атмосфере.

Прежде, всего сделаем несколько пояснений, необходимых для дальнейшего изложения. Полное сопротивление атмосферы определяется формулой (9). Со-противление столба атмосферы формулой:

$$\hat{R}_c = \int_R^{R+H} \frac{dr}{\lambda(r)}. \quad (17)$$

Выражение для потенциала ионосферы (16) получено в предположении экспоненциального изменения электрической проводимости с высотой (8). В то же время в случае произвольного закона изменения электрической проводимости эта формула перестает быть верной и для оценок потенциала ионосферы необходимо использовать формулу:

$$\begin{aligned} \varphi_\infty &= \hat{R} \sum_{i=1}^N \frac{R_{i1}}{R_{ic}} I_i = \hat{R} \cdot I \\ R_{ic} &= R_{i1} + R_{i2} + R_{i3} + \hat{R}. \end{aligned} \quad (18)$$

где  $R_{i1}$  – внутреннее сопротивление грозового генератора (т.е. сопротивление между положительным и отрицательным зарядами),  $R_{i2}, R_{i3}$  – сопротивление между положительным зарядом и ионосферой и сопротивление между отрицательным зарядом облака и ионосферой соответственно.

Электрическая проводимость в атмосфере может изменяться под действием аэрозольных частиц и радиоактивных веществ, как естественного, так и антропогенного [13]. Расчеты влияния изменений электрической проводимости под влиянием этих факторов на ГЭЦ были рассмотрены в работах [2, 4] на основе балансовой токовой модели, развитой в работе [12].

В работе [2] распределение концентрации легких ионов, определяющих электрическую проводимость, определялось на основе стационарного уравнения (2). Предполагалось, что аэрозольными частицами являются ядра конденсации, распределение которых в атмосфере задавалось в следующем виде:

#### IV. ВЫВОД УРАВНЕНИЯ ДЛЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В стационарном случае в сферической системе координат с началом в центре Земли имеем уравнение, следующее из уравнения  $\nabla(\lambda(r)\nabla\varphi) = 0$ :

$$\lambda(r) \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0. \quad (18)$$

Для электрической проводимости используется следующее представление:

$$\begin{aligned} \lambda(r) &= \eta \lambda_0 e^{\alpha(r-r_0)}, r - r_0 \in [0, H] \text{ (область I)}, \\ \lambda(r) &= \lambda_0 e^{\alpha(r-r_0)}, r - r_0 \in [H, H_0] \text{ (область II)} \end{aligned} \quad (19)$$

где  $\eta$  – коэффициент поглощения, величина, определяющая уменьшение проводимости в первой области, за счет присутствия аэрозольных частиц и определение которой будет рассмотрено ниже,  $r_0$  – радиус сферической Земли,  $H_0$  – высота нижней границы ионосферы, равная 60-70 км.

Границные условия для решения данной задачи представляются в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varphi_{r=r_0=0} &= 0, \\ \varphi_{|(r-r_0)=H_0} &= \varphi_\infty. \end{aligned} \quad (20)$$

Кроме того, при  $r - r_0 = H$  надо использовать равенство потенциалов для решений, полученных в областях I и II и плотности электрического тока на этой границе. Для проводимости, задаваемой соотношениями (19) уравнение (18) при  $r \gg \alpha^{-1}$  сводится к следующему:

$$\frac{d}{dr} \left( \lambda \frac{d\varphi}{dr} \right) = 0. \quad (21)$$

Интегрируя это уравнение по области I, получим:

$$\varphi_1(r) = -\frac{C_1}{\eta\alpha\lambda_0} e^{-\alpha(r-r_0)} + C_2, \quad (22)$$

где  $C_1, C_2$  – постоянные.

Используя при  $r = r_0$  граничное условие  $\varphi(r_0) = 0$ , получим  $C_2 = \frac{C_1}{\eta\alpha\lambda_0}$  и для  $\varphi_1(r)$  имеем соотношение:

$$\varphi_1(r) = \frac{C_1}{\eta\alpha\lambda_0} (1 - e^{-\alpha(r-r_0)}). \quad (23)$$

Для второго решения в области II имеем:

$$\varphi_2(r) = -\frac{C_3}{\alpha\lambda_0} e^{-\alpha(r-r_0)} + C_4, \quad (24)$$

где  $C_3, C_4$  – постоянные.

Используя второе граничное условие в (20), получим для этого решения представление:

$$\varphi_2(r) = \varphi_\infty + \frac{C_3}{\alpha\lambda_0} (e^{-\alpha H_0} - e^{-\alpha(r-r_0)}). \quad (25)$$

Для определения постоянных  $C_1$  и  $C_3$  воспользуемся условиями непрерывности потенциала и плотности тока при  $r - r_0 = H$ , которые представляются в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varphi_1(H) &= \varphi_2(H) \\ j_1(H) &= j_2(H), \\ j_1(H) &= \lambda_1(H)E_{1r}(H) = j_2(H) = \lambda_2 E_{2r}(H). \end{aligned} \quad (26)$$

Из второго уравнения системы (26) получим  $C_1 = C_3$ . Тогда из первого соотношения (26) получим выражение для  $C_1$ :

$$C_1 = \frac{\varphi_\infty}{\left[ \frac{1}{\alpha\eta\lambda_0} (1 - e^{-\alpha H}) + \frac{1}{\alpha\lambda_0} (e^{-\alpha H} - e^{-\alpha H_0}) \right]}. \quad (27)$$

Для радиальной составляющей напряженности электрического поля в области I получим:

$$\begin{aligned} E_{r_1}(r) &= -\frac{C_1}{\eta\lambda_0} e^{-\alpha(r-r_0)} = \\ &= -\frac{\varphi_\infty e^{-\alpha(r-r_0)}}{\eta\lambda_0 \left[ \frac{1}{\alpha\eta\lambda_0} (1 - e^{-\alpha H}) + \frac{1}{\alpha\lambda_0} (e^{-\alpha H} - e^{-\alpha H_0}) \right]} = \\ &= -\frac{\alpha\varphi_\infty e^{-\alpha(r-r_0)}}{1 - e^{-\alpha H} + \eta(e^{-\alpha H} - e^{-\alpha H_0})}. \end{aligned} \quad (28)$$

А в области II имеем:

$$\begin{aligned} E_{r_2}(r) &= -\frac{C_1}{\lambda_0} e^{-\alpha(r-r_0)} = \\ &= -\frac{\varphi_\infty}{\lambda_0 \left[ \frac{1}{\alpha\eta\lambda_0} (1 - e^{-\alpha H}) + \frac{1}{\alpha\lambda_0} (e^{-\alpha H} - e^{-\alpha H_0}) \right]}. \end{aligned} \quad (29)$$

Необходимо отметить, из работы [14], что потенциал ионосфера при наличии аэрозольных частиц связан потенциалом ионосферы соотношением  $\varphi_\infty^a = \frac{\varphi_\infty}{\eta}$ , т.е. при  $\eta < 1$  он возрастает.

Также авторами [5] был рассмотрен вопрос изменчивости  $\varphi_\infty^a$  в зависимости от площади покрытия поверхности Земли аэрозольными частицами  $\gamma$ . Так, при  $\gamma = 0,1$ ,  $\varphi_\infty^a = 1,106 \cdot \varphi_\infty$ , а при  $\gamma = 0,01$ ,  $\varphi_\infty^a = 1,001 \cdot \varphi_\infty$ .

Показано, что при уменьшении  $\gamma$ ,  $\varphi_\infty^a \rightarrow \varphi_\infty$  и, как следствие, потенциал ионосферы на территориях, покрытых аэрозольными частицами становится близок к значению потенциала ионосферы в «чистой» атмосфере (250-300 кВ). При этом значение сопротивления в столбе атмосферы увеличивается, вследствие чего происходит уменьшение тока проводимости, текущего к земной поверхности.

При  $H < 1/\alpha$ ,  $H_0 \rightarrow \infty$  получим в области I выражение для напряженности электрического поля:

$$E_{r_1} = -\frac{\alpha\varphi_\infty}{\eta} e^{-\alpha(r-r_0)}. \quad (30)$$

## V. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ ИОНОВ

Из работы [14] следует выражение для  $\eta$ :

$$\eta = \left( \frac{(\beta N)^2}{4q\alpha} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\beta N}{2\sqrt{q\alpha}} N. \quad (31)$$

где  $\beta$  – интегральный коэффициент присоединения ионов к аэрозольным частицам;  $N$  – концентрация аэрозольных частиц;  $q$  – интенсивность ионообразования;  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации легких ионов.

Вычислим эту величину, полагая  $N = 10^9 \text{ м}^{-3}$ ,  $\beta = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ ,  $q = 10^7 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $\alpha = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ . В итоге получим  $\eta = 0,82$ .

В случае, если учесть в выражении (31) зависимость  $\beta$  от типа ионов, то вместо этого выражения, получим:

$$\eta = \left[ \left( \frac{(\beta+N)^2}{4q\alpha} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\beta+N}{2\sqrt{q\alpha}} \right] + \left[ \left( \frac{(\beta-N)^2}{4q\alpha} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\beta-N}{2\sqrt{q\alpha}} \right]. \quad (32)$$

Это соотношение следует из уравнений ионизационно-рекомбинационного равновесия записанных для каждого типа ионов. в стационарном случае [15].

$$\begin{aligned} 0 &= q - \alpha n_+^2 - n_+ \sum_r \beta_+(r) N(r) \\ 0 &= q - \alpha n_-^2 - n_- \sum_r \beta_-(r) N(r). \end{aligned} \quad (33)$$

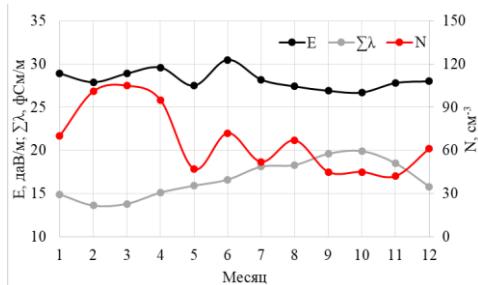
Решение этих уравнений определяет концентрацию положительных и отрицательных легких ионов в зависимости от концентрации аэрозольных частиц и более общее выражение для  $\eta$  имеет вид:

$$\begin{aligned} \eta &= \left[ \left( \frac{\sum_r \beta_+(r) N(r)^2}{4q\alpha} + 1 \right)^{1/2} - \frac{\sum_r \beta_+(r) N(r)}{2\sqrt{q\alpha}} \right] + \\ &+ \left[ \left( \frac{\sum_r \beta_-(r) N(r)^2}{4q\alpha} + 1 \right)^{1/2} - \frac{\sum_r \beta_-(r) N(r)}{2\sqrt{q\alpha}} \right]. \end{aligned} \quad (34)$$

## VI. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ВЛИЯНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ НА ЭЛЕМЕНТЫ ГЭЦ

Сетевые наблюдения за электрическими характеристиками атмосферы (ЭХА), такими как напряженность электрического поля приземного слоя атмосферы и полярными электрическими проводимостями воздуха, проводятся с середины XX века на территории СССР, а позже Российской Федерации [16, 17].

С 2013 данный вид наблюдений ведётся на станции Тикси, которая расположена на берегу Северного Ледовитого океана. Помимо ЭХА на данной станции до 2018 года осуществлялся комплекс программ по наблюдению за концентрацией аэрозоля. Также в порядке эксперимента наблюдения за концентрацией аэрозоля проводились на станции Войкovo в весенне-летний период 2017 года [5].

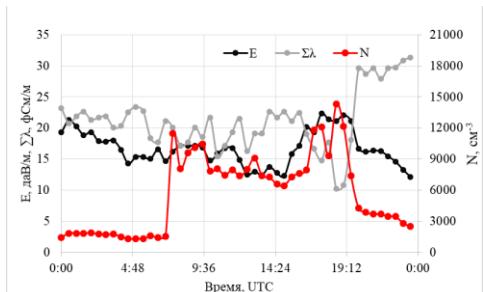


Ри . 1. Сезонный ход электрических параметров атмосферы и концентрации аэрозольных частиц в по . Тикси

На рис. 1 показан пример годового хода осредненных значений суммарной электрической проводимости воздуха ( $\Sigma\lambda = \lambda_+ + \lambda_-$ ) и напряженности электрического поля (E), а также и медианных значений концентрации аэрозольных частиц (N) субмикронного диапазона (3...200 нм) по результатам наблюдения на станции Тикси. Данные по E представлены в декавольтах на метр для более удобного отображения.

Из графика видно, что сезонные вариации  $\Sigma\lambda$  находятся в противофазе к вариациям N, принимая максимальные значения в период сентябрь-октябрь, а минимальные в февраль-март. Концентрация аэрозоля, при этом, в те же периоды имеет обратные экстремумы. Весенний минимум  $\Sigma\lambda$  и, соответственно, максимум N обусловлен таким явлением, как арктическая дымка. Данное явление определяется дальним меридиональным переносом аэрозолей различного происхождения из средних широт в зимне-весенний период.

Зависимость сезонной изменчивости E от N выражена не столь заметно, повторяемость колебаний проявляется в период с апреля по июль. Коэффициенты корреляции Пирсона между N и  $\Sigma\lambda$  составил -0,82 и 0,56 между E и N.



Ри . 2. Суточный ход электрических параметров атмосферы и концентрации аэрозольных частиц в по . Войково

На рис. 2 представлен пример суточного хода анализируемых величин для пункта наблюдения Войково. Данные усреднялись по полчасовым интервалам. Следует отметить, что выбранный день, удовлетворяет критериям «хорошей погоды».

Из графика видно, что резкий рост концентрации аэрозольных частиц около 6 часов по UTC никак не влияет на колебания ЭХА. При этом, начиная со второй половины рассматриваемых суток, значения  $\Sigma\lambda$  находятся в противофазе к N, тогда как ход E наоборот повторяет колебания концентрации.

Пример обратного процесса показан около 20:00 UTC, когда вследствие смены воздушной массы резкое снижение N сопровождалось одновременным уменьшением E и увеличением  $\Sigma\lambda$ . В этом случае коэффициент корреляции Пирсона между N и E составил 0,75, а между N и  $\Sigma\lambda$  — минус 0,97.

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрено понятие глобальной электрической цепи в атмосфере. Показаны основные модели, полученные на основе уравнений Максвелла. Данные модели описывают все электрические процессы, протекающие в атмосфере кроме быстропеременных таких как молнии, спрайты, джеты и эльфы.

Показано теоретическое влияние слоев аэрозольных частиц на напряженность электрического поля в зависимости от механизмов поглощения аэроионов в окружающей среде. Также даны оценки зависимости потенциала ионосферы от доли земной поверхности, покрытой аэрозолем.

Помимо теоретических оценок приведены результаты наблюдений за электрическими характеристиками атмосферы, а также концентрацией аэрозольных частиц субмикронного диапазона в приземном слое в условно чистом регионе (пос. Тикси) и в районе с повышенной антропогенной нагрузкой (пос. Войково). Показана зависимость электрических характеристик от концентрации аэрозольных частиц, что хорошо согласуется с общепризнанными физико-математическими моделями.

## ЛИТЕРАТУРА

- Морозов В.Н. Теоретическое моделирование электрических процессов в нижних слоях свободной атмосферы: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – СПб., 1995. – 366 с.
- Makino M., Ogawa T. Quantitative Estimation of Global Circuit // J. Geophysical Res. – 1985. – Vol. 90, No. D4. – P. 5961-5966.
- Ogawa T. Fair-weather electricity // J. Geophys. Res. – 1985. – Vol. 90, No. D4. – P. 5951-5960.
- Sarkota B.K., Varshneya P. On the global atmospheric electrical circuit // J. Atmospheric Terr. Phys. – 1990. – Vol. 52, No. 1. – P. 4-17.
- Морозов В.Н. Палей А.А., Пи анко Ю.В., Соколенко Л.Г., Зайнетдинов Б.Г. Экспериментальные и теоретические исследования влияния аэрозольных частиц частиц субмикронного аэрозоля на электричество приземного слоя // Труды Главной Геофизической Обсерватории им. А.И. Войкова. – 2018. – № 590. – С. 27-47.
- Ака оғыу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. – М.: Мир, 1974. – 384 с.
- Roble R.G. On modeling component processes in the Earth's global electric circuit // J. Atmospheric Sol.-Terr. Phys. – 1991. – Vol. 53, No. 9. – P. 3291-3305.
- Морозов В.Н. Атмосферное электричество // Атмосфера. Справочник. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1991. – С. 395-408.
- Имянитов И.М. Строение и условия развития грозовых облаков // Метеорология и Гидрология. – 1981. – № 3. – С. 4-17.

10. Морозов В.Н. Модели глобальной атмосферно-электрической цепи // ВНИИГМИ- МЦД Серия Метеорология Обзорная Информация. – 1981. – № 8.
11. Hays P.B., Roble R.G. A quasi-static model of global atmospheric electricity. 1. The lower atmosphere // J. Geophysical Res. – 1979. – Vol. 84, No. A7. – P. 3291-3305.
12. Makino M., Ogawa T. Responses of atmospheric electric field and air-earth current to variation of conductivity profiles // J. Atmospheric Terr. Phys. – 1984. – Vol. 46, No. 5. – P. 431-435.
13. Брикар Дж. Влияние радиоактивности и загрязнений на элементы атмосферного электричества // Проблемы атмосферного электричества. Труды III Международной конференции по электричеству атмосферы и космического пространства. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1969. – С. 68-104.
14. Морозов В.Н. Влияние глобального распределения аэрозольных частиц на электрический потенциал ионосфера // Труды Главной Геофизической Обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2015. – № 577. – С. 106-112.
15. Hoppel W.A., Frich G. Ion-aerosol attachment coefficients on the steady-state charge distributions on aerosols in bipolar ion environment // Aerosol Sci. Technol. – 1986. – Vol. 5, No. 1. – P. 1-21.
16. Зайнетдинов Б.Г., Михайлова Ю.П., Соколенко Л.Г., Стерхов П.Л. Наземные и самолётные исследования электрических характеристик атмосферы в Советской и Российской Арктике. Прошлое, настоящее, будущее // Материалы Восьмой Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд. “Паулсен,” 2020. – С. 118-125.
17. Зайнетдинов Б.Г., Соколенко Л.Г. Результаты модернизации и расширения сети наблюдений за атмосферным электричеством // Труды Главной Геофизической Обсерватории им А.И. Воейкова. – 2018. – № 589. – Р. 153-166.

# Некоторые результаты исследований роли взаимодействия процессов в конвективных облаках в формировании их макро- и микроструктурных характеристик

**Ашабоков Борис Азреталиевич**

Институт информатики и проблем регионального  
управления КБНЦ РАН  
Нальчик, КБР, Россия  
*ashabokov.boris@mail.ru*

**Тумгоева Хадижат Абукаровна**

Ингушский государственный университет  
Магас, ИР, Россия  
*hadiga-71@mail.ru*

**Лесев Вадим Николаевич**

Кабардино-Балкарский государственный университет  
имени Х.М. Бербекова  
Нальчик, КБР, Россия  
*pr\_ur@kbsu.ru*

**Шаповалов Виталий Александрович**

Высокогорный геофизический институт  
Нальчик, КБР, Россия  
*vet555\_83@mail.ru*

**Аннотация** Отмечено, что настоящий период времени является переходным для физики облаков: происходит переход от этапа изучения "элементарных" процессов в облаках к этапу изучения облаков в целом с учетом их системных свойств. Одним из направлений развития данного научного направления на наступающем этапе его развития является изучение роли их системных свойств в процессах облакообразования. Приводятся методология, модель и некоторые результаты численного исследования роли эмерджентных свойств облаков в формировании их микроструктурных характеристик.

**Abstract.** It is noted that the present time period is transitional for cloud physics: there is a transition from the stage of studying "elementary" processes in clouds to the stage of studying clouds as a whole, taking into account their system properties. One of the directions of development of this scientific direction at the coming stage of its development is the study of the role of their systemic properties in the processes of cloud formation. The methodology, model and some results of numerical investigation of the role of emergent properties of clouds in the formation of their microstructural characteristics are presented.

**Ключевые слова:** конвективные облака, эмерджентные свойства облаков, механизм взаимодействия, деформация полей термодинамических параметров, град.

**Keywords:** convective clouds, emergent properties of clouds, interaction mechanism, deformation of fields of thermodynamic parameters, hail.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В работе [2] было показано, что примерно с начала 90-х годов в развитии физики облаков и активных воздействий на них появились тенденции, указывающие на замедление ее развития. Причиной этих негативных тенденций, как отмечено в данной работе, является то, что настоящий период времени является переходным для данного научного направления: происходит переход от этапа исследования "элементарных" процессов в облаках

к этапу изучения формирования их макро- и микроструктурных характеристик с учетом их системных свойств.

Важно отметить, что переход научного направления от одного этапа развития к другому не может быть однократным, для этого требуется время, иногда достаточно длительное. В настоящее время нельзя сказать, что все процессы в облаках изучены на достаточном уровне, есть такие процессы, которые не до конца поняты даже на качественном уровне [6]. В большей степени это относится к микрофизическим процессам: к процессам образования и роста первичных капель и кристаллов, к процессам электризации облачных частиц и формирования электрической структуры облаков, к взаимодействию частиц реагентов с облачной средой и т.д.

Такое состояние исследований этих процессов не позволяет формализовать их, препятствует учету их в численных моделях облаков и становится источником серьезных неопределенностей при численном исследовании облаков. С этим связано и то, что на пути агрегирования результатов "элементарных" процессов в облаках, которое возможно только в рамках численных моделей, и, таким образом, на пути развития математического моделирования облаков возникают серьезные трудности. Поэтому на наступающем этапе развития физики облаков продолжение изучения "элементарных" процессов в облаках останется одним из важнейших направлений исследований.

Новым направлением исследований в физике облаков на этом этапе является исследование роли системных свойств облаков в формировании их макро- и микроструктурных характеристик. Такими свойствами являются взаимодействие процессов в облаках и взаимодействие облаков с окружающей их атмосферой, которая является вышестоящей системой для облаков. Именно эти свойства являются структурообразующими для систем, в том числе для облаков [11].

Можно заметить, что на следующих этапах развития физики облаков роль математического моделирования, как метода исследования, значительно повышается, оно становится основным методом исследования. Поэтому повышаются и требования к моделям облаков. Отметим, что в последние годы наблюдается повышение внимания к разработке многомерных и нестационарных численных моделей конвективных облаков. В работе [2] приведена трехмерная нестационарная модель конвективных облаков с детальным учетом процессов, в том числе и микрофизических. В работе [3] приводится такая же модель, но микрофизические процессы в ней учитываются в параметризованном виде.

Остановимся в краткой форме на основных проблемах проведения исследований роли системных свойств облаков в их образовании и развитии. Относительно механизмов взаимодействия облаков с окружающей их атмосферой можно отметить, что их достаточно много и в связи с этим для изучения их роли в процессах облакообразования возникает необходимость выделения наиболее важных из них, также возникает необходимость разработки эффективных методологий, моделей и методов проведения исследований, позволяющих оперативно проводить массовые численные эксперименты и анализировать получающуюся при этом информацию.

Что касается исследований роли взаимодействия процессов в облаках (эмурдентных свойств облаков), то возникающие в данном направлении проблемы носят более сложный характер. Они заключаются в том, что выделение конкретных механизмов взаимодействия облачных процессов для исследования их роли возможно в ограниченных случаях и возникает необходимость использования других подходов. К ним, по нашему мнению, относится подход, используемый в настоящей работе и основанный на использовании для проведения исследований косвенных проявлений этих свойств. Но в данном случае проведение исследований может потребовать разработки новых моделей и методов.

Очевидно, что количество публикаций, посвященных результатам исследований по отмеченным направлениям, существенно ограничено. В работах [2, 20] приводятся результаты моделирования роли структуры поля ветра в атмосфере в формировании грозоградовых облаков, т.е. в исследованиях рассматривался механизм взаимодействия облаков и атмосферы, который обусловлен полем ветра в атмосфере. Исследования проводились на основе трехмерной нестационарной модели [2].

Но на то, что поле ветра в атмосфере в состоянии оказать существенное влияние на процессы облакообразования, внимание обратили относительно давно. Можно, например, отметить работы [5–27], в которых приведены некоторые результаты исследований в данном направлении. Из этих работ в [5, 9, 10, 17–19] исследования проводились путем радиолокационного наблюдения за процессами образования и развития облаков при различных полях ветра в атмосфере. Но детальное исследование роли данного фактора возможно только на основе математического моделирования. В работах [12, 14, 16, 21, 23–27] исследования в этом направлении проводились на основе численного моделирования.

В краткой форме остановимся на состоянии активного воздействия (АВ) на конвективные облака. Можно сказать, что оно носит достаточно сложный и неоднозначный характер. В основе используемых для управления процессами осадкообразования в конвективных облаках технологий до настоящего времени, можно сказать, лежат не методы АВ, полученные в результате строгих исследований, а концепции, предложенные в прошлом столетии. Но с учетом недостаточной изученности облачных процессов и связанной с ней существенной ограниченностью наших знаний о закономерностях формирования макро- и микроструктурных характеристик облаков предложение научно обоснованных концепций АВ на такие сложные и нелинейные системы, как конвективные облака, не представляется возможным. В связи с этим и с учетом повышения потребности в эффективных технологиях управления процессами осадкообразования в облаках актуальность разработки научно обоснованных методов АВ существенно повышается.

Задачи, возникающие на этом пути, можно сформулировать в виде [1]:

- нахождение локальной области в облаке, в которой условия благоприятны для достижения целей активного воздействия;
- определение концентрации частиц реагента, которую следует обеспечить в данной области в каждый момент времени.

На пути решения этих задач возникают серьезные трудности. В большей степени это касается второй задачи. Использование моделей облаков для решения этих задач пока еще сводится к перебору различных вариантов внесения реагента, причем, для этой цели могут использоваться самые различные модели [2, 4, 7, 13, 15]. Среди них могут быть и такие, которые не подходят для решения этих задач. Очевидно, что результаты решения отмеченных задач, полученные таким способом, могут оказаться не самыми удачными, что делает разработку методологий и методов их решения актуальной проблемой. Отметим еще, что необходимость интенсификации проведения исследований по отмеченным выше направлениям, включая исследования по развитию методов АВ на облака с целью регулирования осадков и предотвращения градобитий, связана еще и с тем, что, несмотря на ограниченность наших знаний о процессах формирования макро- и микроструктурных характеристик конвективных облаков, практические работы по АВ на облака приняли широкие масштабы.

Ниже остановимся на методологии и некоторых результатах исследования роли взаимодействия процессов в конвективных облаках в формировании их микроструктурных характеристик.

## II. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Методология проведения исследований роли взаимодействия процессов в облаках в формировании их микроструктурных характеристик, как было отмечено, основана на использовании для этой цели проявления этого взаимодействия. В качестве такого проявления данного системного свойства облаков в настоящей работе используется деформация поля температуры в облаке по

сравнению с ее полем в окружающей атмосфере. Она, как известно, связана с взаимодействием динамических, термодинамических и микрофизических процессов в облаке. Исследование ее роли проводилось для мощных несимметричных градовых облаков. Для этой цели использовалась двумерная численная модель микрофизических процессов в градовых облаках на фоне заданной гидротермодинамики. Микрофизические процессы в модели описываются детально. Она позволяет проследить процессы формирования микроструктуры облака для различных вариантов деформаций поля температуры.

В модели учитываются такие микрофизические процессы, как коагуляция капель, аккреция, замерзание капель, осаждение облачных частиц в поле силы тяжести, а также их перенос воздушными потоками [20]. Система уравнений, которые описывают изменение в пространстве и во времени функций распределения по массам капель  $f_1(x, z, m, t)$  и ледяных частиц  $f_2(x, z, m, t)$ , записывается в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial t} + V_x \frac{\partial f_1}{\partial x} + (V_z - V_1) \frac{\partial f_1}{\partial z} &= \left[ \frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_k + \left[ \frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_a + \\ &+ \left[ \frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_o + \left[ \frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_s + \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial f_1}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial f_1}{\partial z} + I_1, \quad (1) \\ \frac{\partial f_2}{\partial t} + V_x \frac{\partial f_2}{\partial x} + (V_z - V_2) \frac{\partial f_2}{\partial z} &= \left[ \frac{\partial f_2}{\partial t} \right]_a + \left[ \frac{\partial f_2}{\partial t} \right]_s + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial f_2}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial f_2}{\partial z} + I_2 + u \\ 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq z \leq L_z, 0 \leq m < \infty, t > 0, \end{aligned}$$

где  $V_x(x, z)$  и  $V_z(x, z)$  – составляющие вектора скорости воздушных потоков по осям Ox и Oz;  $V_1(m)$ ,  $V_2(m)$  – установленные скорости падения капель и ледяных частиц;  $K(x, z)$  – коэффициент турбулентной диффузии;  $\left[ \frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_k$ ,  $\left[ \frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_a$ ,  $\left[ \frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_o$ ,  $\left[ \frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_s$  – изменения функции распределения капель за счет процессов коагуляции, аккреции, дробления и замерзания капель;  $\left[ \frac{\partial f_2}{\partial t} \right]_a$ ,  $\left[ \frac{\partial f_2}{\partial t} \right]_s$  – изменения функции распределения кристаллов за счет аккреции и замерзания капель;  $L_x$ ,  $L_z$  – верхние значения границ пространственной области.

Для проведения расчетов применялся метод расщепления по физическим процессам.

Функции  $I_1(x, z, m, t)$ ,  $I_2(x, z, m, t)$  описывают образование капель и кристаллов в естественных условиях, функция  $u(x, z, m, t)$  – образование искусственных кристаллов при активном воздействии, т.е. при внесении частиц льдообразующего реагента.

Система уравнений (1) дополняется начальными и граничными условиями, соответственно (2) и (3):

$$\begin{aligned} f_1(x, z, m, 0) &= f_1^0(x, z, m) \\ f_2(x, z, m, 0) &= f_2^0(x, z, m) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} f_1(x, z, m, t) &= f_2(x, z, m, t) = 0 \\ \text{при } x = 0, x = L_x, z = L_z, \\ \partial f_2(x, z, m, t) / \partial z &= \partial f_2(x, z, m) / \partial z = 0 \\ \text{при } z = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Дискретные значения  $x_i$  и  $z_j$  и  $m_n$  задавались в виде:

$$x_i = i \cdot 1000 \text{ м}, i \in [0:30];$$

$$z_j = j \cdot 500 \text{ м}, j \in [0:30];$$

$$m_0 = 2 \cdot 10^{-10} \text{ г}, m_n + 1 = 2 \cdot m_n, n \in [1:39].$$

Размеры ледяных частиц рассчитаны в предположении, что плотности льда  $\rho = 0,9 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ .

Поля скоростей воздушных потоков в облаке, как было отмечено, в модели заданы и не меняются с течением времени, для их построения использовались эмпирические модели структуры воздушных потоков в мощных кучево-дождевых облаках, а также ее характеристики, полученные в результате измерений. В передней и центральной частях облака расположены области восходящих потоков, максимальное значение скорости составляет 35 м/с. В нижней половине тыловой части облака расположена область нисходящих потоков. Такая структура воздушных потоков характерна для мощного градового облака. Она соответствует вертикальному разрезу облака, находящегося в квазистационарном состоянии, вдоль направления его движения. Составляющие вектора скорости воздушных потоков  $V_x$  и  $V_z$  найдены путем интерполяции их значений на крупной сетке, а их значения в узлах сетки  $(x_i, z_j)$ , ( $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$ ) на основе двумерной кубической сплайн-интерполяции. При определении поля температуры в облаке учитывалось, что под влиянием восходящих потоков и фазовых переходов воды происходит его деформация по сравнению с полем температуры в атмосфере [8]. Максимальное отклонение температуры в облаке от ее значения в атмосфере на таком же уровне  $\Delta T$  определялось на основе экспериментальных данных. Было предположено, что оно составляет 13 °C–14 °C. В области нисходящих потоков воздуха значения  $\Delta T$  отрицательны, а максимум равен 4 °C – 5 °C.

Было предположено, что в начальный момент времени спектр капель описывается формулой Хригана-Мазина, а спектр кристаллов гамма-распределением [8]. Пространственное распределение жидких и твердых частиц в начальный момент задавалось в соответствии с полем температуры в облаке и принятой динамикой. Наибольшая концентрация капель наблюдается в центре облака и составляет 800 см<sup>-3</sup>.

Модель позволяет использовать различные поля скоростей воздушных потоков, при этом их вид определяется типом моделируемого облака. Для моделирования симметричных градовых облаков использовалась такая структура поля скоростей, которая характерна для них. При моделировании мощных облаков его структура задавалась по Браунингу и Футу [22].

Из системы уравнений (1) можно заметить, что процессы диффузионного роста облачных частиц в модели в явном виде отсутствуют. Учет этих процессов в модели осуществляется через начальные функции распределения и источники частиц. Предположено, что начальные распределения капель и кристаллов, которые описываются формулой Хригана-Мазина и гамма-функцией, сформированы под влиянием процессов конденсации и сублимации, в дальнейших изменениях функций распределения частиц в облаке роль этих процессов незначительна.

В табл. 1, например, приводятся значения концентрации ледяных частиц в начальный момент времени на разных уровнях в плоскости ХОZ.

ТАБЛИЦА 1. КОНЦЕНТРАЦИЯ ЛЕДЯНЫХ ЧАСТИЦ В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ НА РАЗНЫХ УРОВНЯХ В ЦЕНТРЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ОБЛАКА ( $x=15$  км)

$z$ (км)	$T$ ( $^{\circ}$ C)	$n$ ( $m^{-3}$ )
10	-30	990
9	-21,5	180
8	-15	47
7	-9,6	9,7
6	-4,8	1,6
5	-0,5	0,4

Можно заметить, что концентрация кристаллов увеличивается по высоте с уменьшением температуры, т.к. возрастает вероятность замерзания капель. Кроме этого, они переносятся вверх восходящими потоками воздуха. Более быстрыми темпами она увеличивается, начиная примерно с температурного уровня  $-10$   $^{\circ}$ C.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Остановимся на результатах исследования роли взаимодействия процессов в формировании их микроструктуры. Для этой цели были проведены расчеты с использованием различных вариантов структуры поля скоростей воздушных потоков в облаке с соответствующими им отклонениями температуры в облаке от ее значения в атмосфере.

Результаты расчетов показали, что на образование и рост зародышей градин существенное влияние оказывает величина деформации поля температуры, которая определяется характеристиками восходящих воздушных потоков и процессов фазовых переходов воды. Важно отметить, что при отсутствии такой деформации для образования градовых частиц в облаке требуются нереально большие водности, примерно  $80$   $g/m^3$ , т.е. можно сказать, что в этом случае в облаке град не образуется. Он образуется, начиная с некоторой величины  $\Delta T$ , определяемой параметрами облака.

На рис. 1 приведены изолинии параметров облака на 18 и 24 мин. его развития, в случае,  $\Delta T$  примерно равно  $13$   $^{\circ}$ C. Можно заметить, что в верхней части области, расположенной над и между изотермами  $-10$   $^{\circ}$ C и  $-25$   $^{\circ}$ C происходит формирование кристаллов, с диаметрами в интервале  $2-5$  мм. Они являются зародышами градин и, находясь между этими изотермами, смещаются влево и вниз. Одновременно происходит увеличение их концентрации за счет поступающих снизу замерзших относительно крупных капель, а также их рост за счет переохлажденных капель, поступающих снизу в область между отмеченными изотермами. Таким образом, под влиянием взаимодействия процессов в мощных градовых облаках происходит формирование протяженной зоны, в которой условия благоприятны для образования и роста градовых частиц. Деформация поля температуры способствует увеличению протяженности данной зоны и, как следствие, увеличению времени нахождения в ней градовых частиц и, таким образом, образованию крупных градин.

Для сравнения отметим, что, согласно результатам изотопного анализа градин, модальные значения температуры зарождения града на крупяных зародышах составляет  $-20$   $^{\circ}$ C... $-25$   $^{\circ}$ C, а на замерзших каплях примерно  $-10$   $^{\circ}$ C. Согласно этим же исследованиям, рост града происходит в температурном интервале  $-10$   $^{\circ}$ C ... $-25$   $^{\circ}$ C.

Таким образом, можно сказать, что результаты расчетов температурных условий образования и роста зародышей градин согласуются с результатами, полученными экспериментальным путем. Результаты расчетов указывают еще на то, что формирование слоистой структуры градин обусловлено изменениями режима их роста при движении в интервале температур  $-10$   $^{\circ}$ C ... $-25$   $^{\circ}$ C, а не движениями вверх и вниз по вертикали, кроме этого, они четко показывают, что деление облака в вертикальном или горизонтальном направлении на зоны (зона зарождения града, зона роста града и т.д.), как это принято в настоящее время, не соответствует реальной картине.

Таким же образом радиолокационная структура градовых облаков в целом подтверждает полученную в результате расчетов схему образования градовых осадков в облаках, а также роль взаимодействия процессов гидротермодинамики и микрофизики в формировании их микроструктуры. Важно еще отметить, что, как показывают результаты расчетов, формирование так называемой "зоны аккумуляции" в облаке не наблюдается.

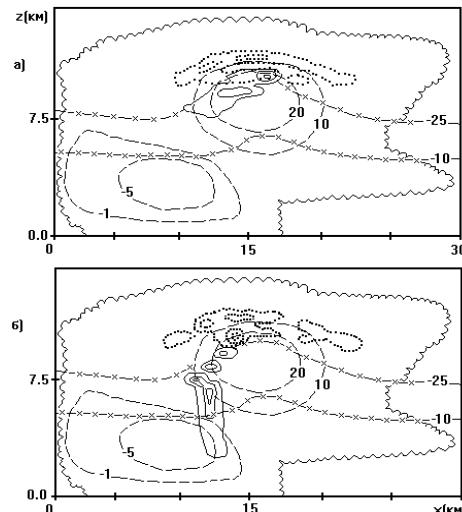


Рис. 1. Изолинии параметров облака при  $t = 18$  мин (а) и  $t = 24$  мин (б):

- изолинии концентрации крупных градин с  $d=2$  см;
- ..... изолинии концентрации кристаллов с  $d=2-5$  мм;
- x-x- изолинии температуры;
- изолинии скорости вертикальных потоков

На рис. 1 видно, что в температурном интервале от значений  $-10$   $^{\circ}$ C до  $-25$   $^{\circ}$ C изолинии концентрации крупных градин образуют замкнутые области. Это свидетельствует о том, что происходит циклическое изменение интенсивности градовых осадков из облака. Объяснение причин такого поведения характеристик осадков не представляется возможным. Среди процессов, приводящих к образованию и росту частиц осадков, отсутствуют циклические процессы. Поэтому, видимо, можно предположить, что такая особенность выпадения осадков из облаков обусловлена взаимодействием облачных процессов.

Очевидно, что в реальных условиях структуры воздушных потоков и поля температуры в облаке могут оказаться значительно более сложными, чем использованные при проведении расчетов. Таким же образом, деформация поля температуры может носить более

сложный характер, чем на рис. 1. В связи с этим заданное поле температуры в модели, можно сказать, носит осредненный характер. В реальных условиях рассматриваемая часть облака, в которой происходит образование и рост градовых частиц, видимо, будет состоять из взаимодействующих между собой неоднородностей, в которых температура выше, чем в окружающей атмосфере.

#### IV. Выводы

1) Дальнейший прогресс физики облаков и активных воздействий на них связан с изучением закономерностей формирования макро- и микроструктурных характеристик облаков с учетом их системных свойств, с разработкой новых эффективных технологий управления процессами осадкообразования в конвективных облаках, основанных на новых представлениях о закономерностях формирования их макро- и микроструктурных характеристик, с развитием численного моделирования облаков.

2) Предложены методология и модель и на их основе проведены численные эксперименты по исследованию влияния взаимодействия процессов в облаках на формирование их микроструктурных характеристик.

3) Исследования показали, что роль взаимодействия процессов в облаках значительна в процессах облако- и осадкообразования. Данное системное свойство существенным образом влияет на формирование структуры облака.

4) Под влиянием взаимодействия процессов в мощных градовых облаках формируется протяженная зона, в которой условия благоприятны для образования и роста градовых частиц. Она расположена между изотермами -10 °C ... -25 °C, образование, движение и рост градин происходит в данной зоне.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В. Разработка нового физического принципа воздействия на градовые процессы кристаллизующим реагентом на основе численного моделирования // Доклады Третьей международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». – Ставрополь, 2018. – С. 39-42.
2. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Физика облаков и активных воздействий на них. – Нальчик: Печатный двор. 2017. – 240 с.
3. Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Затевахин М.А., Игнатьев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С. Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО. – 2016. – Вып. 282. – С. 45-91.
4. Владимиров С.А., Пастушков Р.С. Комплексный метод активных воздействий на конвективные облака с целью регулирования осадков. Трехмерное численное моделирование // Труды ГГО. – 2016. – Вып. 582. – С. 116-127.
5. Ковальчук А.Н. О влиянии ветрового сдвига на выпадение града // Труды ВГИ. – 1969. – Вып. 14. – С. 39-48.
6. Коган Е.Л., Мазин И.П., Сергеев Б.Н., Хворостынянов В.И. Численное моделирование облаков. – М.: Гидрометеоиздат, 1984. – 185 с.
7. Кузнецов И.Е., Страшко О.В., Дорофеев В.В., Гоцев Д.В. Математическая модель характеристик конвективноустойчивой атмосферы с учетом микрофизических процессов в облаках // Сборник трудов ИТНТ-2018 «Информационные технологии и нанотехнологии». 24–27 апреля 2018 года. – Самара: Предприятие "Новая техника", 2018. – С. 1566-1575.
8. Мазин И.П., Шметер С.М. Облака. Строение и физика образования. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 280 с.
9. Макитов В.С., Илюхин В.С., Кущев С.А., Лиев К.Б. Формирование градового облака при слиянии конвективных ячеек // Физика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 58, №. 4. – С. 448-455. – DOI: 10.31857/S0002351522040095.
10. Мальбахова Н. М. Взаимосвязь структуры градовых облаков с вертикальной структурой ветра в атмосфере // Труды ВГИ. – 1990. – Вып. 80. – С. 99-106.
11. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы. – М.: Мир, 1978. – 381 с.
12. Ньютона Ч.У. Гидродинамическое взаимодействие с окружающим полем ветра как один из факторов развития кучевых облаков // Динамика кучевых облаков. – М.: Мир, 1964. – С. 187-201.
13. Павлов Г.С. Моделирование гидротермодинамики кучевых облаков на естественных и альтернативных ядрах конденсации в атмосфере Земли // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. МК Аммосова. – 2020. – №. 6 (80). – С. 48-56.
14. Пастушков Р.С. О развитии кучевых облаков в атмосфере с вертикальным сдвигом ветра // Метеорология и гидрология. – 1969. – № 4. – С. 26-41.
15. Пастушков Р.С. Модель активных воздействий на конвективные облака льдообразующими аэрозолями // Труды ГГО. – 2016. – Вып. 582. – С. 128-157.
16. Пастушков Р.С. Численное моделирование взаимодействия конвективных облаков с окружающей их атмосферой // Труды ЦАО. – 1972. – Вып. 108. – С. 93-97.
17. Томашова А.С. Особенности полей температуры и ветра при формировании мезомасштабных конвективных систем // Азимут геонауки : Материалы Международной молодежной научной конференции, Томск, 07–09 декабря 2021 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2022. – С. 76-80.
18. Федосеева Е.В. и др. Исследование процессов формирования и развития опасных атмосферных метеоявлений, связанных с эволюцией конвективной облачности // Распространение радиоволн. – 2019. – С. 258-262.
19. Федченко Л.М., Гораль Г.Г., Беленюкова В.А., Мальбахова Н.М. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. – М.: Гидрометеоиздат. 1991. – 425 с.
20. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Shapovalov A.V., Kalov H.M., Kalov R.H., Sherieva M.A., Shapovalov V.A. Mathematical Modeling of the Influence of the Wind Field Structure in the Atmosphere on the Cloud // ACS. – 2018. – Vol. 8, No. 1. – P. 84-96.
21. Baur F., Keil C., Barthlott C. Combined effects of soil moisture and microphysical perturbations on convective clouds and precipitation for a locally forced case over Central Europe // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2022. – DOI: 10.1002/qj.4295.
22. Browning K.A., Foote G.B. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1976. – Vol. 102, No. 433. – P. 499-533.
23. Miltenberger A.K. et al. Aerosol–cloud interactions in mixed-phase convective clouds. Part 2: Meteorological ensemble // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2018. – Vol. 18, No. 14. – P. 10593-10613.
24. Onishi R., Takahashi K. A Warm-Bin–Cold-Bulk Hybrid Cloud Microphysical Model // Journal of the Atmospheric Sciences. – 2012. – 69. – P. 1474-1497.
25. Shpund J., Khain A., Rosenfeld D. Effects of sea spray on microphysics and intensity of deep convective clouds under strong winds // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2019. – Vol. 124, No. 16. – P. 9484-9509.
26. Tompkins A.M. Organization of tropical convection in low vertical wind shears: The role of cold pools // Journal of the atmospheric sciences. – 2001. – Vol. 58, No. 13. – P. 1650-1672.
27. Wellmann C. et al. Using emulators to understand the sensitivity of deep convective clouds and hail to environmental conditions // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. – 2018. – Vol. 10, No. 12. – P. 3103-3122.

# Применение обобщенных тригонометрических систем в спектральных задачах

**Куповых Геннадий Владимирович**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
kupovykh@sfedu.ru

**Клово Александр Георгиевич**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
agklovo@sfedu.ru

**Илюхин Александр Алексеевич**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
aleilyukhin@yandex.ru

**Аннотация.** Предлагается использование функций обобщенных тригонометрических систем при решении спектральных задач для операторов четного порядка выше второго. При этом в постановке задачи помимо стандартных краевых условий могут быть дополнительные условия в одной или нескольких внутренних точках.

**Abstract.** The use of functions of generalized trigonometric systems in solving spectral problems for operators of even order above the second is proposed. At the same time, in addition to the standard boundary conditions, there may be additional conditions at one or more internal points in the formulation of the problem.

**Ключевые слова:** дифференциальный оператор, дополнительные условия для оператора, спектр, обобщенные тригонометрические системы, внутренняя граница, собственные значения.

**Keywords:** differential operator, additional conditions for the operator, spectrum, generalized trigonometric systems, internal boundary, eigenvalue.

## I. ВВЕДЕНИЕ

При решении ряда прикладных задач могут быть использованы наборы функций, обладающие тем свойством, что они при дифференцировании последовательно переходят друг в друга. При этом последняя функция набора переходит в функцию, пропорциональную первой. Одной из первых здесь можно отметить книгу [1], в которой исследовалась прочность корабельных конструкций. В работе [2] для оператора четвертого порядка поставлена задача со стандартными условиями на внешней границе и дополнительным условием во внутренней точке области. Для создания новых методов решения подобных задач в работе [3] введено понятие обобщенной тригонометрической системы (ОС). Это наборы произвольного числа функций с указанными выше свойствами. Для этих функций были сформулированы дифференциальные свойства, проверяемые простым дифференцированием написанных формул. В работе [4] были показаны новые способы исследования функций ОС, связанные с изучением квадратичных форм функций обобщенных тригонометрических систем. Построенная теория позволила решить в явном виде [5, 6] серию спектральных задач для операторов четвертого порядка с дополнительными условиями во внутренних точках области. В настоящей работе показано

далее развитие теории ОС и возможность применения этой теории для решения спектральных задач для операторов произвольного четного порядка.

## II. ОБОБЩЕННЫЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Дадим точные определения обобщенных тригонометрических систем четырех типов. При этом мы будем различать 4 типа таких систем. Они зависят от двух параметров. Это четное или нечетное число базовых линейно независимых функций, а также от того, переходит ли последняя функция при дифференцировании в первую со знаком плюс или минус.

**Определение 1.** Функции  $K_{2n,1}(x), K_{2n,2}(x), \dots, K_{2n,2n}(x)$ ,  $n \in N$ , обладающие свойствами:  $(K_{2n,i}(x))' = K_{2n,i+1}(x)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 2n - 1$ ,  $(K_{2n,2n}(x))' = K_{2n,1}(x)$ ,  $K_{2n,i}(0) = 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, 2n - 1$ ,  $K_{2n,2n}(0) = 1$ , называются обобщенной тригонометрической системой (*o.m.c.[2n;1]*) четного порядка  $2n$  первого типа.

**Определение 2.** Функции  $\Phi_{2n,1}(x), \Phi_{2n,2}(x), \dots, \Phi_{2n,2n}(x)$ ,  $n \in N$ , обладающие свойствами:  $(\Phi_{2n,i}(x))' = \Phi_{2n,i+1}(x)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 2n - 1$ ,  $(\Phi_{2n,2n}(x))' = -\Phi_{2n,1}(x)$ ,  $K_{2n,i}(0) = 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, 2n - 1$ ,  $\Phi_{2n,i}(0) = 0$ , называются обобщенной тригонометрической системой (*o.m.c.[2n;2]*) четного порядка  $2n$  второго типа.

**Определение 3.** Функции  $L_{2n-1,1}(x), L_{2n-1,2}(x), \dots, L_{2n-1,2n-1}(x)$ ,  $n \in N$ , обладающие свойствами:  $(L_{2n-1,i}(x))' = L_{2n-1,i+1}(x)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 2n - 2$ ,  $(L_{2n-1,2n-1}(x))' = L_{2n-1,1}(x)$ ,  $L_{2n-1,i}(0) = 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, 2n - 2$ ,  $L_{2n-1,i}(x) = L_{2n-1,i+2n-1}(x)$ , называются обобщенной тригонометрической системой (*o.m.c.[2n-1;1]*) нечетного порядка  $2n - 1$  первого типа.

**Определение 4.** Функции  $G_{2n-1,1}(x), G_{2n-1,2}(x), \dots, G_{2n-1,2n-1}(x)$ ,  $n \in N$ , обладающие свойствами:  $(G_{2n-1,i}(x))' = G_{2n-1,i+1}(x)$ ,  $G_{2n-1,i}(0) = 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, 2n - 2$ ,

$(G_{2n-1,2n-1}(x))' = -G_{2n-1,1}(x)$ ,  $G_{2n-1,i+2n-1}(0) = 1$ , называются обобщенной тригонометрической системой (*o.m.c.*[ $2n-1;1$ ]) нечетного порядка  $2n-1$  второго типа.

Будем считать, что введенные функции определены для всех значений индекса  $i$  с помощью соотношений

$$\begin{aligned} K_{2n,i}(x) &= K_{2n,i+2n}(x), \quad \Phi_{2n,i}(x) = -\Phi_{2n,i+2n}(x), \\ L_{2n-1,i}(x) &= L_{2n-1,i+2n-1}(x), \quad G_{2n-1,i}(x) = -G_{2n-1,i+2n-1}(x). \end{aligned}$$

### III. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ОТС

Заметим, что функции указанных в определениях 1-4 обобщенных тригонометрических систем удовлетворяют соответствующим дифференциальным уравнениям

$$\begin{aligned} y^{(2n)}(x) &= y(x), \quad y^{(2n)}(x) = -y(x), \quad y^{(2n-1)}(x) = y(x), \\ y^{(2n-1)}(x) &= -y(x). \end{aligned}$$

Это означает, что соответствующие функции от суммы аргументов удовлетворяют этим же уравнениям и являются линейными комбинациями их фундаментальных систем решения. В то же время несложно проверить, что сами функции ОТС образуют для этих уравнений фундаментальные системы решений. Например, справедливо равенство

$$\begin{aligned} K_{2n,1}(x+y) &= C_1(y)K_{2n,1}(x) + C_2(y) \times \\ &\quad \times K_{2n,2}(x) + \dots + C_{2n}(y)K_{2n,2n}(x) \end{aligned}$$

подставляя в которое  $x=0$ , получим  $C_{2n}(y)=K_{2n,1}(y)$ . Затем, последовательно дифференцируя выражение для  $K_{2n,1}(x+y)$  и подставляя  $x=0$ , найдем остальные коэффициенты и получим

$$\begin{aligned} K_{2n,1}(x+y) &= K_{2n,1}(x)K_{2n,2n}(y) + K_{2n,2}(x) \times \\ &\quad \times K_{2n,2n-1}(y) + \dots + K_{2n,2n}(x)K_{2n,1}(y) \end{aligned}$$

Дифференцируя полученное равенство и проводя аналогичные рассуждения для функций ОТС других типов, мы приходим к равенствам

$$K_{2n,i}(x+y) = \sum_{j=1}^{2n} K_{2n,j}(x)K_{2n,2n+i-j}(y), \quad i=1,2,\dots,2n, \quad (1)$$

$$\Phi_{2n,i}(x+y) = \sum_{j=1}^{2n} \Phi_{2n,j}(x)\Phi_{2n,2n+i-j}(y), \quad i=1,2,\dots,2n, \quad (2)$$

$$L_{2n-1,i}(x+y) = \sum_{j=1}^{2n-1} L_{2n-1,j}(x)L_{2n-1,2n-1+i-j}(y), \quad i=1,2,\dots,2n-1, \quad (3)$$

$$G_{2n-1,i}(x+y) = \sum_{j=1}^{2n-1} G_{2n-1,j}(x)G_{2n-1,2n-1+i-j}(y), \quad i=1,2,\dots,2n-1. \quad (4)$$

Для исследования возможности получения формул для разности аргументов необходимо исследовать функции ОТС на четность и нечетность.

Заметим, что функции  $K_{2n,1}(-x)$ ,  $\Phi_{2n,1}(-x)$  также удовлетворяют дифференциальным уравнениям  $y^{(2n)}(x)=y(x)$ ,  $y^{(2n)}(x)=-y(x)$ . Поэтому они представляются в виде

$$\begin{aligned} K_{2n,1}(-x) &= C_1 K_{2n,1}(x) + C_2 K_{2n,2}(x) + \\ &\quad + \dots + C_{2n} K_{2n,2n}(x) \\ \Phi_{2n,1}(-x) &= C_1 \Phi_{2n,1}(x) + C_2 \Phi_{2n,2}(x) + \\ &\quad + \dots + C_{2n} \Phi_{2n,2n}(x) \end{aligned}$$

Аналогичным приемом выясняется, что  $K_{2n,1}(-x)=-K_{2n,1}(x)$ ,  $\Phi_{2n,1}(-x)=-\Phi_{2n,1}(x)$ .

После дифференцирования найденных равенств мы можем сделать вывод, что функции ОТС четного порядка с нечетными номерами являются нечетными функциями, а функции ОТС четного порядка с четными номерами являются четными функциями.

Следовательно, справедливы формулы для функций разности аргументов функций ОТС четного порядка

$$K_{2n,i}(x-y) = \sum_{j=1}^{2n} (-1)^{2n+i-j} K_{2n,j}(x) \times \times K_{2n,2n+i-j}(y), \quad i=1,2,\dots,2n, \quad (5)$$

$$\Phi_{2n,i}(x-y) = \sum_{j=1}^{2n} (-1)^{2n+i-j} \Phi_{2n,j}(x) \times \times \Phi_{2n,2n+i-j}(y), \quad i=1,2,\dots,2n. \quad (6)$$

Что касается систем нечетного порядка, то здесь ситуация иная. Из очевидных равенств  $L_{2n-1,1}(-x)=G_{2n-1,1}(x)$ ,  $L_{2n-1,2}(-x)=-G_{2n-1,2}(x)$ , ...,  $L_{2n-1,2n-1}(-x)=G_{2n-1,2n-1}(x)$

следует справедливость формул для разности аргументов для функций ОТС нечетного порядка

$$L_{2n-1,i}(x-y) = \sum_{j=1}^{2n-1} (-1)^{i-j} L_{2n-1,j}(x) \times \times G_{2n-1,2n-1+i-j}(y), \quad i=1,2,\dots,2n-1, \quad (7)$$

$$G_{2n-1,i}(x-y) = \sum_{j=1}^{2n-1} (-1)^{i-j} G_{2n-1,j}(x) \times \times L_{2n-1,2n-1+i-j}(y), \quad i=1,2,\dots,2n-1. \quad (8)$$

### IV. МАТРИЧНЫЕ СВОЙСТВА ОТС

В предыдущем пункте для построения тригонометрии функций ОТС использовались дифференциальные свойства этих функций. Новые возможности открываются при исследовании квадратичных форм функций ОТС и их матриц. Здесь важно заметить, что в силу дифференциальных свойств функций ОТС производные от их квадратичных форм также являются квадратичными формами. При этом важно исследовать изменение матрицы квадратичной формы при взятии от нее производной.

Базовым функциям ОТС всех четырех типов соответствует их квадратичные формы. Например, функциям *o.m.c.*[ $2n;1$ ] соответствует квадратичная форма

$$A(x) = \sum_{1 \leq i, j \leq 2n} a_{ij} K_{2n,i}(x) K_{2n,j}(x) \quad (9)$$

и ее матрица  $A^0 = (a_{ij})$ ,  $a_{ij} = a_{ji}$ ,  $1 \leq i \leq j \leq 2n$ . Тогда матрица  $A^1$ , соответствующая производной квадратичной формы (9), имеет вид

$$\begin{pmatrix} 2a_{1,2n} & a_{11} + a_{2,2n} & a_{12} + a_{3,2n} & \dots & a_{1,2n-2} + a_{2n-1,2n} & a_{1,2n-1} + a_{2n,2n} \\ a_{11} + a_{2,2n} & 2a_{12} & a_{13} + a_{22} & \dots & a_{1,2n-1} + a_{2,2n-2} & a_{1,2n} + a_{2,2n-1} \\ a_{12} + a_{3,2n} & a_{13} + a_{22} & 2a_{23} & \dots & a_{2,2n-1} + a_{3,2n-2} & a_{2,2n} + a_{3,2n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{1,2n-2} + a_{2n-1,2n} & a_{1,2n-1} + a_{2,2n-2} & a_{2,2n-1} + a_{3,2n-2} & \dots & 2a_{2n-2,2n-1} & a_{2n-2,2n} + a_{2n-1,2n-1} \\ a_{1,2n-1} + a_{2n,2n} & a_{1,2n} + a_{2,2n-1} & a_{2,2n} + a_{3,2n-1} & \dots & a_{2n-2,2n} + a_{2n-1,2n-1} & 2a_{2n-1,2n} \end{pmatrix}$$

Возникает несколько вопросов. Существует ли не равная 0 квадратичная форма (9), производная которой и соответствующая матрица  $A^1$  равны 0. Такие квадратичные формы будут равны константе и дадут нам аналоги основного тригонометрического и основного гиперболического тождеств.

Могут быть поставлены и другие вопросы. Например, как найти квадратичную форму, производная от которой равна квадрату определенной функции ОТС. Ответ на этот вопрос поможет в нормировании собственных функций при решении спектральных задач. Также находит приложения и ответ на вопрос, существует ли квадратичная форма, являющаяся функцией того же порядка, но другого типа.

## V. ОБОБЩЕННЫЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТОЖДЕСТВА

Вернемся к первой из поставленных проблем. Мы ищем квадратичные формы, производные от которых равны 0. Пусть матрица  $A^1$ , соответствующая производной квадратичной формы, состоит из нулевых элементов. Тогда, в частности, равны 0 элементы на ее главной диагонали  $a_{1,2n}, a_{i,i+1}, i = 1, 2, \dots, 2n-1$ . Отсюда равны 0 в основной матрице  $A^0$  элементы на второй диагонали от главной, состоящей из  $2n-1$  элементов и один верхний правый элемент на  $2n$ -й диагонали. Теперь рассмотрим третью и предпоследнюю строчки матрицы  $A^1$ . Здесь во всех позициях находится сумма двух элементов, один из которых уже равен 0. Так как и сумма этих элементов равно 0, то равны 0 вторые слагаемые, т.е. элементы  $a_{1,4}, a_{2,5}, \dots, a_{2n-3,2n}$  и  $a_{1,2n-2}, a_{2,2n-1}, a_{3,2n}$ . Теперь равны 0 в основной матрице  $A^0$  элементы на четвертой диагонали от главной, и на  $(2n-2)$ -й диагонали. В дальнейшем все диагонали с четными номерами заполнены нулевыми элементами.

Возьмем любой элемент на главной диагонали, например, положим, что  $a_{1,1} = 1$ . Теперь из равенства 0 элементов матрицы  $A^1$  однозначно, последовательно определяются элементы  $a_{2,2n} = -1, a_{3,2n-1} = 1, \dots, a_{n+1,n+1} = (-1)^n$ . Эта цепочка порождает квадратичную функцию

$$\begin{aligned} K_{2n,1}^2(x) - 2K_{2n,2}(x)K_{2n,2n}(x) + 2K_{2n,3}(x) \times \\ \times K_{2n,2n-1}(x) - \dots + \\ + (-1)^{n-1}K_{2n,n}(x)K_{2n,n+2}(x) + (-1)^n K_{2n,n+1}^2(x), \end{aligned}$$

равную константе. Константа, в данном случае равная 0, определяется из начальных условий. Если взять по очереди условия  $a_{i,i} = 1, i = 1, 2, \dots, n$ , то мы таким же образом получим обобщенные тригонометрические тождества

$$\begin{aligned} K_{2n,n+1}^2(x) + (-1)^n K_{2n,1}^2(x) = \\ = 2 \sum_{j=1}^{n-1} (-1)^{n+j-1} K_{2n,1-j}(x)K_{2n,1+j}(x), \\ K_{2n,n+2}^2(x) + (-1)^n K_{2n,2}^2(x) = \\ = 2 \sum_{j=1}^{n-1} (-1)^{n+j-1} K_{2n,2-j}(x)K_{2n,2+j}(x), \\ \dots \\ K_{2n,2n-1}^2(x) + (-1)^n K_{2n,n-1}^2(x) = \\ = 2 \sum_{j=1}^{n-1} (-1)^{n+j-1} K_{2n,n-1-j}(x)K_{2n,n-1+j}(x), \\ K_{2n,2n}^2(x) + (-1)^n K_{2n,n}^2(x) = \\ = 1 + 2 \sum_{j=1}^{n-1} (-1)^{n+j-1} K_{2n,n-j}(x)K_{2n,n+j}(x). \end{aligned} \quad (10)$$

для ОТС четного порядка первого типа.

Рассмотрим теперь функции ОТС четного порядка второго типа. Здесь возможны аналогичные построения и получение обобщенных тригонометрических тождеств

$$\begin{aligned} \Phi_{2n,n+1}^2(x) + (-1)^{n-1} \Phi_{2n,1}^2(x) = \\ = 2 \sum_{j=1}^{n-1} (-1)^{n+j} \Phi_{2n,1-j}(x)\Phi_{2n,1+j}(x), \\ \Phi_{2n,n+2}^2(x) + (-1)^{n-1} \Phi_{2n,2}^2(x) = \\ = 2 \sum_{j=1}^{n-1} (-1)^{n+j} \Phi_{2n,2-j}(x)\Phi_{2n,2+j}(x), \\ \dots \\ \Phi_{2n,2n-1}^2(x) + (-1)^{n-1} \Phi_{2n,n-1}^2(x) = \\ = 2 \sum_{j=1}^{n-1} (-1)^{n+j} \Phi_{2n,n-1-j}(x)\Phi_{2n,n-1+j}(x), \\ \Phi_{2n,2n}^2(x) + (-1)^{n-1} \Phi_{2n,n}^2(x) = \\ = 1 + 2 \sum_{j=1}^{n-1} (-1)^{n+j} \Phi_{2n,n-j}(x)\Phi_{2n,n+j}(x). \end{aligned} \quad (11)$$

Мы нашли для ОТС четного порядка  $2n$  каждого из типов ровно  $n$  не содержащих пропорциональных слагаемых тождеств, обобщающих основные тригонометрические тождества. Можно убедиться в том, что найденные тождества включают в себя все возможные их варианты. В самом деле, если такая квадратичная форма содержит слагаемое  $K_{2n,i}(x)K_{2n,j}(x)$  или  $\Phi_{2n,i}(x)\Phi_{2n,j}(x)$ , то она будет содержать все слагаемые с такой же суммой индексов  $i + j$ . Если эта сумма является нечетным числом, то при взятии производной от этой квадратичной формы будет только одно слагаемое, являющееся квадратом функции ОТС, и в ноль выражение не обратится. Если же является четным числом, то среди слагаемых квадратичной формы есть слагаемой, пропорциональное квадрату функции ОТС, и мы приходим к рассмотренному случаю.

Для ОТС нечетного порядка обобщенные тригонометрические тождества не существуют. В самом деле, базовым функциям, например,  $o.m.c.[2n-1;1]$  соответствует квадратичная форма

$$A_{2n-1}(x) = \sum_{1 \leq i \leq j \leq 2n-1} a_{ij} L_{2n-1,i}(x) L_{2n-1,j}(x)$$

и ее матрица  $A_{2n-1}^0 = (a_{ij})$ ,  $a_{ij} = a_{ji}$ ,  $1 \leq i \leq j \leq 2n-1$ .

Тогда матрица  $A_{2n-1}^1$ , соответствующая производной этой квадратичной формы, примет вид

$$\begin{pmatrix} 2a_{1,n} & a_{11} + a_{2,2n} & a_{12} + a_{3,2n} & \dots & a_{1,2n-2} + a_{2n-1,2n} & a_{1,2n-1} + a_{2n,2n} \\ a_{11} + a_{2,2n} & 2a_{12} & a_{13} + a_{22} & \dots & a_{1,2n-1} + a_{2,2n-2} & a_{1,2n} + a_{2,2n-1} \\ a_{12} + a_{3,2n} & a_{13} + a_{22} & 2a_{23} & \dots & a_{2,2n-1} + a_{3,2n-2} & a_{2,2n} + a_{3,2n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{1,2n-2} + a_{2n-1,2n} & a_{1,2n-1} + a_{2,2n-2} & a_{2,2n-1} + a_{3,2n-2} & \dots & 2a_{2n-2,2n-1} & a_{2n-2,2n} + a_{2n-1,2n-1} \\ a_{1,2n-1} + a_{2n,2n} & a_{1,2n} + a_{2,2n-1} & a_{2,2n} + a_{3,2n-1} & \dots & a_{2n-2,2n} + a_{2n-1,2n-1} & 2a_{2n-1,2n} \end{pmatrix}$$

Мы снова ищем ненулевую матрицу  $A_{2n-1}^0$  такую, что матрица  $A_{2n-1}^1$  состоит из нулевых элементов. Из равенства 0 элементов на главной диагонали  $A_{2n-1}^1$  следует, что в матрице  $A_{2n-1}^0$  равными 0 будут параллельные главной диагонали вторая и последняя. Аналогично тому, как это было для ОТС четного порядка, можно показать, что нулевыми будут диагонали через одну от главной диагонали и от углового элемента. Но для ОТС нечетного порядка при этом окажется заполненной нулями вся матрица  $A_{2n-1}^0$ . То же самое произойдет и для ОТС второго типа нечетного порядка.

Отсюда следует, что для функций ОТС нечетного порядка не существует не нулевых квадратичных форм, равных константе. В то же самое время для систем четного порядка  $2n$  существуют обобщенные тригонометрические тождества, которые нами полностью описаны.

В качестве примера приведем такие тождества для систем порядка 4

$$\begin{aligned} K_{4,1}^2(x) + K_{4,3}^2(x) &= 2K_{4,2}(x)K_{4,4}(x), \\ K_{4,2}^2(x) + K_{4,4}^2(x) &= 1 + 2K_{4,1}(x)K_{4,3}(x), \\ \Phi_{4,3}^2(x) - \Phi_{4,1}^2(x) &= 2\Phi_{4,2}(x)\Phi_{4,4}(x), \\ \Phi_{4,4}^2(x) - \Phi_{4,2}^2(x) &= 1 - 2\Phi_{4,1}(x)\Phi_{4,3}(x) \end{aligned}$$

и для систем порядка 6

$$\begin{aligned} K_{6,1}^2(x) - K_{6,4}^2(x) &= 2 \begin{pmatrix} K_{6,2}(x)K_{6,6}(x) - \\ -K_{6,3}(x)K_{6,5}(x) \end{pmatrix}, \\ K_{6,2}^2(x) - K_{6,5}^2(x) &= 2 \begin{pmatrix} K_{6,1}(x)K_{6,3}(x) - \\ -K_{6,4}(x)K_{6,6}(x) \end{pmatrix}, \\ K_{6,6}^2(x) - K_{6,3}^2(x) &= 1 + 2 \begin{pmatrix} K_{6,1}(x)K_{6,5}(x) - \\ -K_{6,2}(x)K_{6,4}(x) \end{pmatrix}, \\ \Phi_{6,1}^2(x) + \Phi_{6,4}^2(x) &= 2 \begin{pmatrix} \Phi_{6,3}(x)\Phi_{6,5}(x) - \\ -\Phi_{6,2}(x)\Phi_{6,6}(x) \end{pmatrix}, \\ \Phi_{6,2}^2(x) + \Phi_{6,5}^2(x) &= 2 \begin{pmatrix} \Phi_{6,1}(x)\Phi_{6,3}(x) + \\ +\Phi_{6,4}(x)\Phi_{6,6}(x) \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

$$\Phi_{6,3}^2(x) + \Phi_{6,6}^2(x) = 1 + 2 \begin{pmatrix} \Phi_{6,2}(x)\Phi_{6,4}(x) - \\ -\Phi_{6,1}(x)\Phi_{6,5}(x) \end{pmatrix}.$$

## VI. ПЕРВООБРАЗНЫЕ ОТ КВАДРАТОВ ФУНКЦИЙ ОТС

В приложениях, связанных с решением спектральных задач, встречается необходимость нормировать собственные функции. При использовании в решении этих задач функций обобщенных тригонометрических систем потребуется вычислять интегралы от их квадратов. Поэтому перейдем к решению этой задачи. Требуется найти квадратичную форму, производная от которой совпадает с квадратов выбранной функции ОТС или отличается от нее на константу.

Заметим, что для вывода таких формул могут быть использованы различные методы. В то же время справедливость таких формул можно легко проверить путем дифференцирования. Поэтому мы просто приведем некоторые из них.

$$\begin{aligned} \int K_{2n,1}^2(x)dx &= \\ &= \sum_{j=0}^{n-1} (-1)^j \frac{2n-1-2j}{2n} K_{2n,1+j}(x)K_{2n,2n-j}(x) + C, \\ \int K_{2n,n}^2(x)dx &= \\ &= \sum_{j=0}^{n-1} (-1)^j \frac{2n-1-2j}{2n} K_{2n,n+j}(x)K_{2n,n-1-j}(x) + \\ &\quad + \frac{(-1)^n x}{2n} + C, \\ \int \Phi_{2n,1}^2(x)dx &= \\ &= \sum_{j=0}^{n-1} (-1)^{j-1} \frac{2n-1-2j}{2n} \Phi_{2n,1+j}(x)\Phi_{2n,2n-j}(x) + C, \\ \int \Phi_{2n,n}^2(x)dx &= \\ &= \sum_{j=0}^{n-1} (-1)^{j-1} \frac{2n-1-2j}{2n} \Phi_{2n,n+j}(x)\Phi_{2n,n-1-j}(x) + \\ &\quad + \frac{(-1)^{n-1} x}{2n} + C, \\ \int L_{2n-1,1}^2(x)dx &= \\ &= L_{2n-1,1}(x)L_{2n-1,2n-1}(x) - L_{2n-1,2}(x)L_{2n-1,2n-2}(x) + \\ &\quad + L_{2n-1,3}(x)L_{2n-1,2n-3}(x) - \dots + (-1)^n L_{2n-1,n-1}(x) \times \\ &\quad \times L_{2n-1,n+1}(x) - 0,5(-1)^n L_{2n-1,n}^2(x) + C, \\ \int G_{2n-1,1}^2(x)dx &= \\ &= -G_{2n-1,1}(x)G_{2n-1,2n-1}(x) + G_{2n-1,2}(x)G_{2n-1,2n-2}(x) - \\ &\quad - G_{2n-1,3}(x)G_{2n-1,2n-3}(x) + \dots + (-1)^{n-1} G_{2n-1,n-1}(x) \times \\ &\quad \times G_{2n-1,n+1}(x) + 0,5(-1)^n G_{2n-1,n}^2(x) + C, \\ \int K_{3,1}^2(x)dx &= K_{3,1}(x)K_{3,3}(x) - \frac{1}{2} K_{3,2}^2(x) + C, \\ \int L_{3,1}^2(x)dx &= L_{3,1}(x)L_{3,3}(x) - \frac{1}{2} L_{3,2}^2(x) + C, \\ \int K_{4,2}^2(x)dx &= \\ &= \frac{3}{4} K_{4,1}(x)K_{4,2}(x) - \frac{1}{4} K_{4,3}(x)K_{4,4}(x) + \frac{x}{4} + C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int \Phi_{4,3}^2(x) dx &= \\ \frac{3}{4} \Phi_{4,2}(x) \Phi_{4,3}(x) - \frac{1}{4} \Phi_{4,1}(x) \Phi_{4,4}(x) + C, \\ \int \Phi_{6,2}^2(x) dx &= \\ = \frac{5}{6} \Phi_{6,1}(x) \Phi_{6,2}(x) + \frac{1}{2} \Phi_{6,3}(x) \Phi_{6,6}(x) - \\ - \frac{1}{6} \Phi_{6,4}(x) \Phi_{6,5}(x) + C, \end{aligned}$$

## VII. ПОСТАНОВКА НЕКОТОРЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЗАДАЧ

Рассмотрим в области  $D$  задачу на собственные значения

$$X''(x) = \lambda X(x), \quad (12)$$

$$X''(x)|_{x \in \Gamma} = X''(x)|_{x \in \Gamma} = 0, \quad (13)$$

$$X(x)|_{x \in \gamma} = 0. \quad (14)$$

Здесь под  $D$  может пониматься интервал с внешней границей  $\Gamma = \pm l$  и выколотой одной или нескольких точек. Например, это может быть область вида  $D_l = (-l; l)$ ,  $D_{l,0} = (-l; 0) \cup (0; l)$ ,  $D_{l,0,h} = (-l+h; 0) \cup (0; l+h)$ . В первом случае у нас присутствует только внешняя граница  $\Gamma = \pm l$  и мы рассматриваем задачу (12)-(13). В этом случае мы приходим к стандартной задаче без внутренних дополнительных условий. Решение этой задачи ищем в виде

$$\begin{aligned} X(x) = C_1 K_{4,1}(\sqrt[4]{\lambda} x) + C_2 K_{4,2}(\sqrt[4]{\lambda} x) + \\ + C_3 K_{4,3}(\sqrt[4]{\lambda} x) + C_4 K_{4,4}(\sqrt[4]{\lambda} x) \end{aligned}$$

Подставляя функцию  $X(x)$  в (13), мы придем к СЛАУ

$$\begin{cases} -C_1 K_3(\sqrt[4]{\lambda} l) + C_2 K_4(\sqrt[4]{\lambda} l) - \\ -C_3 K_1(\sqrt[4]{\lambda} l) + C_4 K_2(\sqrt[4]{\lambda} l) = 0, \\ C_1 K_4(\sqrt[4]{\lambda} l) - C_2 K_1(\sqrt[4]{\lambda} l) + \\ + C_3 K_2(\sqrt[4]{\lambda} l) - C_4 K_3(\sqrt[4]{\lambda} l) = 0, \\ C_1 K_3(\sqrt[4]{\lambda} l) + C_2 K_4(\sqrt[4]{\lambda} l) + \\ + C_3 K_1(\sqrt[4]{\lambda} l) + C_4 K_2(\sqrt[4]{\lambda} l), \\ C_1 K_4(\sqrt[4]{\lambda} l) + C_2 K_1(\sqrt[4]{\lambda} l) - \\ -C_3 K_2(\sqrt[4]{\lambda} l) + C_4 K_3(\sqrt[4]{\lambda} l) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

для определения ненулевого решения спектральной задачи. Система (15) имеет 2 набора решений, соответствующие четным и нечетным собственным функциям.

Отметим, что оператор порядка 4, определяемый (12) и граничными условиями (13), является положительно определенным и самосопряженным. Эти свойства сохраняются и при рассмотрении некоторых других задач. В частности, условие (13) может быть заменено на одно из условий

$$\begin{aligned} X(x)|_{x \in \Gamma} = X''(x)|_{x \in \Gamma} = 0, \\ X(x)|_{x \in \Gamma} = X'(x)|_{x \in \Gamma} = 0. \end{aligned}$$

Во всех этих случаях решения спектральной задачи может быть найдено с помощью обобщенных тригонометрических систем четвертого порядка первого типа.

Более интересным является ситуация, когда налагается также условие (14). Это дополнительное условие, которого недостаточно для того, чтобы разделить область на части и решать задачи в отдельных областях.

Тем не менее удается таким образом определить решение поставленной спектральной задачи, чтобы сохранить положительную определенность и самосопряженность дифференциального оператора.

Функцию  $X(x)$  мы будем называть решением задачи (12)-(14), если  $X(x)$ , удовлетворяет уравнению (12) в точках области  $D$ , в точках внешней границы  $\Gamma$  удовлетворяет условию (13), в точках внутренней границы  $\gamma$  удовлетворяет условию (14) и непрерывна вместе с производными  $\frac{dX(x)}{dx}$ ,  $\frac{d^2X(x)}{dx^2}$  в области  $D \cup \gamma$ .

Покажем на примере как при решении задач с дополнительными условиями во внутренних точках  $\gamma$  может быть найдено решение искомой задачи.

Пусть задана область  $D_{l,0} = (-l; 0) \cup (0; l)$  с внешней границей  $\Gamma = \pm l$  и одной внутренней точкой  $\gamma = 0$ . Решая задачу на собственные значения (12) с граничными условиями (13) и дополнительным условием (14) будем искать ее решение в виде

$$X(x) = \begin{cases} C_1^- K_1(\sqrt[4]{\lambda} x) + C_2^- K_2(\sqrt[4]{\lambda} x) + \\ + C_3^- K_3(\sqrt[4]{\lambda} x), & -l \leq x < 0, \\ C_1^+ K_1(\sqrt[4]{\lambda} x) + C_2^+ K_2(\sqrt[4]{\lambda} x) + \\ + C_3^+ K_3(\sqrt[4]{\lambda} x), & 0 \leq x \leq l. \end{cases}$$

Заметим, что в таком случае автоматически выполнены условия (12) и (14). Поэтому необходимо подобрать константы  $C_1^-$ ,  $C_1^+$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  таким образом, чтобы были выполнены условия (13). Для этого достаточно решить систему уравнений

$$\begin{cases} -C_1^- K_3(\sqrt[4]{\lambda} l) + C_2^- K_4(\sqrt[4]{\lambda} l) - C_3^- K_1(\sqrt[4]{\lambda} l) = 0, \\ C_1^- K_4(\sqrt[4]{\lambda} l) - C_2^- K_1(\sqrt[4]{\lambda} l) + C_3^- K_2(\sqrt[4]{\lambda} l) = 0, \\ C_1^+ K_3(\sqrt[4]{\lambda} l) + C_2^+ K_4(\sqrt[4]{\lambda} l) + C_3^+ K_1(\sqrt[4]{\lambda} l) = 0, \\ C_1^+ K_4(\sqrt[4]{\lambda} l) + C_2^+ K_1(\sqrt[4]{\lambda} l) + C_3^+ K_2(\sqrt[4]{\lambda} l) = 0, \end{cases}$$

что не представляет больших проблем.

## VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе даны определения всех возможных типов обобщенных тригонометрических систем. Несмотря на многочисленные полученные результаты, теория функций ОТС вполне может развиваться и далее. Эта теория не является замкнутой только лишь на

математических аспектах. Мы видим приложения функций ОТС при решении спектральных задач для уравнений четвертого порядка определенного типа. Перспективно исследовать другие задачи для уравнений четного порядка, выше второго.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крылов А.Н. О расчете балок, лежащих на упругом основании. – Л., изд. АН СССР, 1931.
2. Ефимов А.В., Клово А.Г. Метод промежуточных задач для исследования вопросов разрушения пластины, движущейся под действием внешней, вынуждающей силы // Пятое советско-чехословацкое совещание по применению методов теории функций и функционального анализа к задачам математической физики. (Материалы совещания). – Новосибирск, 1979. – С. 42-44.
3. Клово А.Г. Задачи на собственные значения для одного линейного параметризованного оператора. Деп. ВИНИТИ № 5428-80, 24 дек. 1980. – 34 с.
4. Клово А.Г. Некоторые свойства обобщенных тригонометрических систем // Донецкие чтения 2018: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы III Международной научной конференции. ДНР. Донецк. Т. 1 Физико-математические и технические науки. – 2018. – С. 349-350.
5. Клово А.Г., Илюхин А.А., Куповых Г.В., Ляпунова И.А. Обобщенные тригонометрические системы и спектральные задачи с дополнительными внутренними граничными условиями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 4. – С. 178-191.
6. Клово А.Г., Илюхин А.А., Куповых Г.В. Применение обобщенных тригонометрических систем в спектральных задачах // Материалы XII Международной научно-технической конференции Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2021) в рамках VII Международного научного форума Донецкой народной республики к 100-летию ДонНТУ. г. Донецк, ДОННТУ-2021. – С. 105-109.

# Модифицированная ланчестерская модель как главный элемент мониторинга возможного ущерба

**Бажанов Николай Николаевич**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[nmbazhanov@sfedu.ru](mailto:nmbazhanov@sfedu.ru)

**Сухинин Вячеслав Викторович**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[vsukhinin@sfedu.ru](mailto:vsukhinin@sfedu.ru)

**Богданов Василий Петрович**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[vbogdanov@sfedu.ru](mailto:vbogdanov@sfedu.ru)

**Аннотация.** В работе рассматривается возможность математического моделирования прогноза боевых потерь в случаях локальных вооруженных конфликтов. При этом используется ланчестерская модель прогноза возможного ущерба (в частности, боевых потерь) как для общего случая, так и для варианта нерегулярных формирований. Показано, что объем ущерба в современных локальных конфликтах существенно зависит от применения БПЛА, в частности, боевых дронов различного назначения.

**Abstract.** The paper considers the possibility of mathematical modeling predicting combat losses in cases of local armed conflicts. At the same time, the Manchester model for predicting possible damage (in particular, combat losses) is used both. That the amount of damage in modern local conflicts significantly depends on the use of UAVs, in particular, combat drones for various purposes.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, ланчестерские модели, коэффициенты модели, прогноз, потери, резервы.

Математическое моделирование является современной, универсальной и эффективной технологией прогнозирования в технических и даже гуманитарных отраслях жизнедеятельности людей. Конечно, социальные (в частности военные) проблемы более сложны с точки зрения формализации и априорных оценок, чем технические, однако и они в настоящее время могут быть и являются предметом изучения с помощью математических приемов. В дальнейшем в нашей работе мы будем использовать более «узкое» представление математического моделирования – вычислительный эксперимент. Это, в первую очередь, связано с возможностью обрабатывать большой объем информации на современных многопроцессорных вычислительных устройствах с применением эффективных параллельных алгоритмов. Дополнительно отметим, что многие жизненные ситуации вообще не допускают натурные эксперименты и математическое моделирование остается единственным возможным подходом к прогнозу, вероятностной оценке последствий (в частном случае материального ущерба, а также прямых и косвенных потерь) для сторон – участников вооруженных конфликтов.

Проблема принятия оптимальных (с точки зрения боевых потерь) решений на различных уровнях командования является причиной развития математического моделирования. С помощью вычислительного эксперимента можно получать прогнозы и рекомендации еще до начала реальных боевых действий. В качестве примера в данной работе использована попытка оценить использование беспилотных летательных аппаратов, которые значительно изменяют традиционный прогноз ущерба. Кроме прочих боевых достоинств, использование дронов помогает минимизировать гибель мирного населения. Этот важный фактор был отражен в модифицированной математической модели английского математика Ф.У. Ланчестера. Как известно, он показал, что СЛАУ из нескольких дифференциальных уравнений однородного типа можно использовать для симуляции военного противостояния в воздушном пространстве. Эти уравнения мы взяли за математическую основу концепции вычислительного эксперимента и дополнили коэффициентами, отражающими современные военные технологии, в частности использование боевых дронов.

Канонические ланчестерские модели, которые описываются системой уравнений (1), мы заимствовали из работы [1], которую в дальнейшем изложении цитируем.

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = ax + bxy + cy + d \\ \frac{dy}{dt} = ey + fyx + gx + h \end{cases}, \quad (1)$$

Здесь коэффициенты  $a$  и  $e$  определяют небоевой ущерб; коэффициенты  $b$  и  $f$  – потери из-за воздействия по целям, занимающие большую площадь и представляющие собой совокупность точечных целей, расположенных на территории с небольшими промежутками (места скопления войск и транспорта, железнодорожные узлы, аэродромы); коэффициенты  $c$  и  $g$  – ущерб на линии фронта; коэффициенты  $d$  и  $h$  – дополнительные резервы личного состава и вооружений (здесь будем учитывать количество дронов – «камикадзе»).

В настоящее время вряд ли можно ожидать крупномасштабные и длительные военные конфликты (войны), однако для политиков, планирующих локальные военные действия по-прежнему актуально прогнозирование

ущерба. Поэтому в теории военной науки каноническая модель Ланчестера (имеются только коэффициенты  $b$  и  $f$ ) дополнена моделью Осипова (коэффициенты  $a$  и  $e$ ), моделью Петерсона (коэффициенты  $a$  и  $e$ ) и моделью Брекни (коэффициенты  $a$  и  $f$  либо  $b$  и  $e$ ). Жертвы одной стороны пропорциональны количеству боестолкновений, а другой – численности ее противника. Однако в этих моделях не отражены новейшие технологии ведения боя, которые все больше и больше становятся дистанционными. Очевидным недостатком такого подхода является устаревшая военная терминология «наши силы». Как было показано в работах [1–4] из которых часть математических формул корректно заимствована, система ОДУ Ланчестера наиболее удобна в так называемой нормальной форме (2):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -ax - cy \pm d \\ \frac{dy}{dt} = -ey - gx \pm h \end{cases}, \quad (2)$$

где  $a$  и  $e$  определяют скорость небоевых потерь;  $c$  и  $g$  – боевых потерь. [1–3].

В проведенном исследовании предлагается для обсуждения поправка на «технологический прогресс», под которым мы подразумеваем использование дронов в боевых операциях, исход которых может быть предрешен до начала реальных боевых действий. Члены при  $x$  и  $y$  с коэффициентом  $b$  и  $f$  вводится в  $c$  и  $g$ . В этом случае, по нашему мнению, должна появиться поправка на использование БПЛА.

Существует много типов моделей, описывающих динамику протекания вооруженных конфликтов. Они опираются на различные принципы и относятся к различным областям математического моделирования, однако канонические модели на базе ОДУ (Ланчестер составил их для описания боевых столкновений) по-прежнему являются наиболее известными.

В работе была применена базовая модель Ланчестера, исследована и сделана попытка ее модификации с учетом современных особенностей ведения боевых действий. Современные особенности (которые по-прежнему характеризуются коэффициентом боевых потерь) были заложены в модель Ланчестера путем изменения парадигмы потерь: потери военнослужащих должны быть сведены к минимуму за счет технических средств ведения боя и, в первую очередь, использования БПЛА.

### Общая ланчестерская модель при различных возможностях противников

Каноническая модель Ланчестера достаточно условно представляет две противоборствующие стороны, которые принято считать сторонами в военном конфликте, однако при несложных допущениях можно представлять как конкурентов на рынке товаров и услуг. Однако в дальнейшем мы будем придерживаться традиционного математического обозначения участников конфликта, которые большинство авторов обозначают через  $x(t)$  и  $y(t)$ . В частности «этн функции описывают численность

войск первой (второй) стороны в момент времени  $t > 0$ . Скорость изменения численности войск каждой из сторон определяется тремя факторами:

- потерями, которые пропорциональны численности своих войск;
- боевыми потерями, которые пропорциональны численности войск противника или произведению численностей войск обеих сторон;
- вводом дополнительных ресурсов военной техники и личного состава.

Математическое описание модели «обычного сражения» выглядит следующим образом [4]:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= -ax(t) - by(t) + u(t), \\ \dot{y}(t) &= -cx(t) - dy(t) + v(t), \\ \dot{x}(t) &= -ax(t) - gx(t)y(t) + u(t), \\ \dot{y}(t) &= -dy(t) - hx(t)y(t) + v(t), \end{aligned}$$

где  $a, b, c$  и  $d$  – положительные константы;  $u(t)$  и  $v(t)$  – темпы ввода резервов.

Аналогично описываются *партизанская война*:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= -ax(t) - gx(t)y(t) + u(t), \\ \dot{y}(t) &= -cx(t) - dy(t) + v(t). \end{aligned}$$

где  $g$  и  $h$  – положительные константы, и *смешанная война*

$$\dot{x}(t) = by(t), \dot{y}(t) = -cx(t).$$

Модели отличаются учетом боевых потерь: в сражении каждая сторона в единицу времени уничтожает число противников, пропорциональное своей численности. Коэффициенты  $b$  и  $c$ , называемые *коэффициентами боевой эффективности*, могут измеряться, к примеру, как число выстрелов, которое производит один сражающийся в единицу времени, умноженное на вероятность поражения (каждый выстрел поражает одного противника). Меткость (вероятность поражения) у противников будем считать одинаковой» [4].

### Модель при равных возможностях противников

Рассмотрим модель (1) при равных возможностях противников. В качестве коэффициентов примем произвольные безразмерные величины в интервале  $[0;1]$ :

$$\begin{aligned} (dx(t))/(dt) &= -0.5x(t) - 0.4y(t) + 0.3, \\ (dy(t))/(dt) &= -0.5x(t) - 0.4y(t) + 0.3. \end{aligned}$$

Здесь  $a=g=0,5$  – скорость небоевых потерь;

Чтобы оценить влияние динамики скорости боевых потерь на исход битвы, предположим, что у условного противника №1 боевые потери выше:

$$\begin{aligned} (dx(t))/(dt) &= -0.9x(t) - 0.4y(t) + 0.3, \\ (dy(t))/(dt) &= -0.5x(t) - 0.4y(t) + 0.3 \end{aligned}$$

Решение системы приводит к следующему результату: Векторное поле динамики двух противников значительно меняется, смещается в сторону первого противника.

### Модель при разных возможностях противников

Предположим теперь, что скорость боевых потерь выше у противника №1:

$$(dx(t))/(dt) = -0.5 x(t) - 0.9 y(t) + 0.3,$$

$$(dy(t))/(dt) = -0.5 x(t) - 0.5 y(t) + 0.3.$$

Решение системы представлено ниже.

Векторное поле системы показывает, что боевые потери первого противника отражаются и на втором.

Рассмотрим превосходство второго противника по количеству подходящих резервов, приняв остальные коэффициенты со средними значениями:

$$(dx(t))/(dt) = -0.5 x(t) - 0.5 y(t) + 0.1,$$

$$(dy(t))/(dt) = -0.5 x(t) - 0.5 y(t) + 0.9.$$

Решение приводит к смещение динамики в сторону второго противника.

Интерес представляют и другие вариации коэффициентов в общей ланчестерской модели (1). Например, как быстро изменится расстановка сил, если скорость боевых потерь ниже скорости небоевых потерь.

Учитывая, что стратегии ведения боя могут меняться не один раз в течение одного вооруженного конфликта, то и расстановка сил, и поле направлений противников могут существенно меняться.

### Модель противостояния между частями регулярной армии и повстанцами

Война между регулярными и нерегулярными вооруженными формированиями могут быть представлены другим вариантом вычислительного эксперимента. Очевидны два фактора: нерегулярные вооруженные формирования (можно использовать термины повстанцы, партизаны) действуют скрытно, у них нет стационарных военных объектов или развитой инфраструктуры и эту особенность достаточно сложно формализовать и отразить в коэффициентах математической модели. Однако эта особенность ведения современного боя (после пуска ракет или залпа гаубиц) расчеты очень быстро перемещаются с места атаки. Эта важная деталь была отражена авторами в модификации ланчестерской модели в виде дополнительных коэффициентов, отражающих современную тактику ведения боя.

### Построение модели

Важное уточнение заключается в том, что «темп потерь партизан, проводящих свои операции в разных местах на некоторой известной территории, пропорционален не только численности армейских соединений  $N_1(t)$ , но и численности самих партизан  $N_2(t)$ , т.е. определяется членом вида  $\beta(t)N_1N_2$ . В результате модель становится нелинейной:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\alpha_1(t)N_1 - \beta_2(t)N_2 + \gamma_1(t), \quad (3)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\alpha_2(t)N_2 - \beta_1(t)N_1N_2 + \gamma_2(t).$$

В (3) все величины имеют тот же смысл, что и в (1). Изучим модель (3) (модель Ланчестера) в частном случае:  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$  (стороны не получают подкреплений

(вариант «котла»);  $\alpha_1 = const$ ,  $\alpha_2 = const$ ;  $\beta_1 = const$ ,  $\beta_2 = const$  (последнее означает, в частности, что у противников всегда найдется достаточное количество вооружений, которое может использоваться резервистами).

Так же, как и при действии регулярных частей, победа обеспечивается не только начальной численностью, но и боевой выучкой и качеством оружия. Пусть, например,  $C_1 > 0$ , т.е.

$$\frac{\beta_1}{2}N_1^2(0) > \beta_2N_2(0).$$

Тогда партизанам необходимо обеспечить увеличение коэффициента  $\beta_2$  и повысить свою начальную численность  $N_2(0)$  на соответствующую величину, иначе они обречены на поражение. Причем это увеличение с ростом величины  $N_1(0)$  должно расти не линейно, а пропорционально второй степени  $N_1(0)$  (параболический закон боевых действий)» [3–4].

### Анализ модели

Построим данную модель, используя *Matlab*. Зададим функции для решения дифференциального уравнения.

Функция для обычной модели:

```
function fun=fun1(t,y,a1,a2,b1,b2,h1,h2)
    fun=zeros(2,1);
    fun(1)=-a1*y(1)-b2*y(2)+h1;
    fun(2)=-a2*y(2)-b1*y(1)*y(2)+h2.
```

Функция для модели, где прирост армии равен 0, т.е.  $h1 = h2 = 0$ :

```
function fun=fun2(t,y,a1,a2,b1,b2)
    fun=zeros(2,1);
    fun(1)=-a1*y(1)-b2*y(2);
    fun(2)=-a2*y(2)-b1*y(1)*y(2).
```

Функция для модели, где потери определяются только действиями противника, т.е  $a1 = a2 = 0$ :

```
function fun=fun3(t,y,b1,b2)
    fun=zeros(2,1);
    fun(1)=-b2*y(2);
    fun(2)=-b1*y(1)*y(2).
```

Сама программа тогда выглядит следующим образом:

```
a1=0.1; %Скорости потерь из-за обычных причин
a2=0.05;
b1=0.008; %Темпы потерь из-за действий противника
b2=1;
h1=0.01; %Скорости поступления подкреплений;
h2=0.001;
N1=900; %Численность армии
N2=500;
```

Рассмотрим обычный случай:

```
[t,y]=ode23(@fun1,[0 3],N1 N2),[],a1,a2,b1,b2,h1,h2);
```

```
plot(t,y(:,1),t,y(:,2),'r');
```

```
grid;
```

```
legend('Army','Partyzans');
```

```
xlabel('Time');
```

```
ylabel('Army,Partyzans');
```

В работе [3] указано, что боевые потери партизан со временем сильно замедляются.

График зависимости численностей регулярной армии и партизан друг от друга представлен в этом же источнике [3] на рис. 9.

Вывод в *Matlab* будет следующим:

```
plot(y(:,1),y(:,2));
grid;
xlabel('Army 1');
ylabel('Partizans').
```

Если рассмотреть частный случай приостановки пополнения ресурсов (военный термин «котел»), т.е.  $h1=h2=0$ .

Вывод в *Matlab* будет следующим:

```
plot(y(:,1),y(:,2));
grid;
xlabel('Army 1');
ylabel('Partizans')
```

Сделаем предварительные выводы. В процессе подготовки магистерской работы были изучены основные теоретические результаты по использованию системы обыкновенных дифференциальных уравнений, извест-

ной как модель Ланчестера. При этом основными из множества других доступных источников магистранты выбрали работы [ $1\beta_2 = \text{const}$ ]. В процессе изучения опубликованных результатов, магистранты предложили усовершенствовать стандартную модель ущерба, которая учитывала бы особенности ведения боевых действий в современных условиях, в частности уточнение ущерба в связи с массовым применением БПЛА различного назначения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Митюков Н.В. Определение жертв войн через ланчестерские модели // Историческая психология и социология истории. – Волгоград: Изд-во "Учитель" 2009. – Т. 2, № 2. – С. 122-140. – ISSN: 1994-6287. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15175214&>.
2. Митюков Н.В. Математические модели и программные средства для реконструкции военно-исторических данных: автореф. ... д-ра тех. наук. – Ижевск, 2008.
3. Митюков, Н.В., Юртиков, Р.А., Мокроусов, С.А., Данышин, И.А. Программа моделирования войсковых операций «Lanchester v2.0» / ГР в ВНТИЦ 16.03.2006 № 50200600362. Отраслевой фонд алгоритмов и программ 14.03.2006 № 5843. Заявл. 14.02.2006 № 03524577.01350-01 99 01. Инновации в науке и образовании 3:14.
4. Митюков Н.В. Имитационное моделирование в военной истории. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007.

# Методы численного моделирования применительно к задачам электродинамики атмосферы

**Белоусова Ольга Васильевна**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[obelousova@sedu.ru](mailto:obelousova@sedu.ru)

**Клово Александр Георгиевич**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[azklovo@sedu.ru](mailto:azklovo@sedu.ru)

**Чумак Маргарита Игоревна**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[machumak@sedu.ru](mailto:machumak@sedu.ru)

**Куповых Геннадий Владимирович**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[kuprovkh@sedu.ru](mailto:kuprovkh@sedu.ru)

**Аннотация.** Для построения численных моделей нестационарных электродинамических процессов в атмосфере осуществлен переход к дискретной модели горизонтально-однородного приземного слоя, заполненного многозарядным заряженными аэрозольными частицами и проведено исследование этой модели. Сделан сравнительный анализ различных методов дискретизации. Исследованы погрешность аппроксимации дискретной модели, её устойчивость и консервативность применительно к задачам электродинамики приземного слоя.

**Abstract.** For numerical simulation of unsteady electrodynamic processes in the atmosphere, a discrete model of a horizontally homogeneous surface layer filled with single-charged monodisperse aerosol particles has been studied. A comparative analysis of various sampling methods is made. The approximation error, stability and conservativeness of the discrete model in relation to the problems of electrodynamics of the surface layer are investigated.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, дискретизация, приземный слой, электродный эффект, ионизация, электрическое поле.

**Keywords:** mathematical modeling, discretization, surface layer, electrode effect, ionization, electric field.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Электрической структурой приземного слоя атмосферы формируется под влиянием электродного эффекта (ЭЭ). ЭЭ, в свою очередь, описывается системой ионизационно-рекомбинационных уравнений и, входящего в эту систему, уравнения Пуассона [1]. Проблема ЭЭ понимается как задача о нахождении электрических характеристик атмосферы, таких как распределения по высоте электрического поля, проводимость воздуха и плотность тока вблизи земной поверхности. Характеристики образующегося электродного слоя зависят от метеорологических условий, степени ионизации воздуха и аэрозольного (в том числе радиоактивного) загрязнения атмосферы. Учет загрязнения атмосферы приводит к усложнению уравнений за счет появления тяжелых ионов, образующихся за счет воссоединения аэроионов с аэрозольными частицами [1]. Добавляются также уравнения переноса

аэрозольных образований. Высота электродного слоя в разных условиях меняется от нескольких десятков сантиметров до десятков метров.

Стационарные модели классического (нетурбулентного) и турбулентного электродного эффекта, в частных случаях, допускают аналитические решения [2]. Применение только аналитических методов требует физически упрощать постановки задач. В частности, необходимо использовать те или иные предположения, например, о постоянстве электрического поля, проводимости воздуха, скорости ионизации воздуха в приземном слое, или линеаризовать ионизационно-рекомбинационные уравнения (без учета рекомбинации аэроионов) и т.п. [2].

Применение численных методов в моделировании применительно к задачам электродинамики атмосферы расширило возможности исследований и позволяет отказаться от большинства допущений. С математической точки зрения стационарная система уравнений электродного эффекта с граничными условиями представляет собой так называемую двухточечную краевую задачу для обыкновенных дифференциальных уравнений [3]. Краевая задача сводилась к задаче Коши методом «стрельбы по мишени»: значение неизвестной функции на нижней границе электродного слоя подбиралось таким образом, чтобы решение удовлетворяло граничным условиям на бесконечности [2]. Для численного интегрирования уравнений использовался метод Рунге-Кutta четвертого порядка [3, 4].

Необходимость исследования электрических процессов в приземном слое привело к нестационарным электродинамическим моделям, построенным в приближении электродного эффекта в чистой атмосфере. Системы уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями решались численно с использованием конечно-разностного подхода, который основывается на схемах с весами [5, 6]. В работах [7–8] построены нестационарные электродинамические модели приземного слоя в присутствии заряженных аэрозольных частиц (ионов) в атмосфере с учетом их размера и числа зарядов

на них. Для численной реализации использовался алгоритм численного решения на основе двухпараметрического семейства схем с весами. Такой алгоритм обеспечивает выполнение законов сохранения при переходе на дискретный уровень и устойчивость относительно начальных и граничных условий.

В приведенных работах не приводится сравнительного анализа разработанных конечно-разностных схем с другими, в частности выбор способа линеаризации не обосновывается, а другие варианты не рассматриваются. Цель работы – построение и исследование дискретной модели электродинамики приземного слоя атмосферы в условиях ионизационного загрязнения.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим электродинамическую модель атмосферного приземного слоя с учетом многократно заряженных аэрозольных частиц. Система дифференциальных уравнений с начальными и граничными условиями имеет вид [8, 9]:

$$\begin{aligned}
 N_0 + \sum_{k=1}^m N_1^{(k)} + \sum_{k=1}^m N_2^{(k)} &= N = \text{const}, \\
 \frac{\partial N_1^{(k)}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left( \chi(z, t) \cdot \frac{\partial N_1^{(k)}}{\partial z} \right) &= n_1 \beta_{11}^{(k-1)} N_1^{(k-1)} - \\
 -n_1 \beta_{11}^{(k)} N_1^{(k)} + n_2 \beta_{21}^{(k+1)} N_1^{(k+1)} - n_2 \beta_{21}^{(k)} N_1^{(k)}, \\
 \frac{\partial N_2^{(k)}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left( \chi(z, t) \cdot \frac{\partial N_2^{(k)}}{\partial z} \right) &= n_2 \beta_{22}^{(k-1)} N_2^{(k-1)} - \\
 -n_2 \beta_{22}^{(k)} N_2^{(k)} + n_1 \beta_{12}^{(k+1)} N_2^{(k+1)} - n_1 \beta_{12}^{(k)} N_2^{(k)}, \\
 \frac{\partial n_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (b_1 E n_1) - \frac{\partial}{\partial z} \left( D_T(z, t) \cdot \frac{\partial n_1}{\partial z} \right) &= \\
 = q(z, t) - \alpha n_1 n_2 - n_1 \sum_{k=0}^{m-1} \beta_{11}^{(k)} N_1^{(k)} - n_1 \sum_{k=1}^m \beta_{12}^{(k)} N_2^{(k)}, & \quad (1) \\
 \frac{\partial n_2}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} (b_2 E n_2) - \frac{\partial}{\partial z} \left( D_T(z, t) \cdot \frac{\partial n_2}{\partial z} \right) &= \\
 = q(z, t) - \alpha n_1 n_2 - n_2 \sum_{k=0}^{m-1} \beta_{22}^{(k)} N_2^{(k)} - n_2 \sum_{k=1}^m \beta_{21}^{(k)} N_1^{(k)}, \\
 \frac{\partial E}{\partial z} &= \frac{e}{\varepsilon_0} \cdot \left( n_1 - n_2 + \sum_{k=1}^m k N_1^{(k)} - \sum_{k=1}^m k N_2^{(k)} \right).
 \end{aligned}$$

Начальные и граничные условия системы:

для легких ионов имеют вид:

$$\begin{aligned}
 n_{1,2}(t=0) &= \frac{-BN + ((BN)^2 + 4\alpha q)^{1/2}}{2\alpha} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{(z-z_0)}{L_0}} \right), \\
 n_{1,2}(z=z_0) &= 0, \quad n_{1,2}(z=l) = \frac{-BN + ((BN)^2 + 4\alpha q)^{1/2}}{2\alpha}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

для тяжелых ионов и электрического поля имеют вид:

$$N_{1,2}^{(k)}(t=0) = B_k, \quad \left( \frac{\partial N_{1,2}^{(k)}}{\partial z} \right)_{z=z_0} = 0,$$

$$N_{1,2}^{(k)}(z=l) = B_k,$$

для электрического поля:

$$E(t=0) = E_0, \quad E(z=z_0) = E_0. \quad (4)$$

Здесь  $n_{1,2}$  – объемные концентрации разнозаряженных легких ионов,  $b_{1,2}$  – подвижности ионов,  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации,  $E$  – напряженность электрического поля,  $q$  – интенсивность ионообразования,  $e$  – элементарный заряд,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $N$  – общая концентрация аэрозольных частиц,  $N_0, N_1, N_2$  – концентрация соответственно нейтральных, положительных и отрицательных тяжелых ионов,  $m$  – максимально возможное число элементарных зарядов на аэрозольной частице,  $k$  – число элементарных зарядов на аэрозольной частице,  $D_T$  – коэффициент турбулентной диффузии легких ионов,  $\chi$  – коэффициент турбулентной диффузии тяжелых ионов,  $\eta_{1,2}$  – коэффициенты воссоединения аэроионов с заряженными и нейтральными аэрозольными частицами, соответственно,  $\beta_{ij}^{(k)}$  – коэффициенты взаимодействия ионов проводимости с  $k$  раз заряженными аэрозольными частицами,  $L_0$  – характерный масштаб электродного слоя,  $z_0$  – параметр шероховатости земной поверхности,  $z$  – высота,  $l$  – верхняя граница электродного слоя, на которой выполняются следующие условия:

$$\frac{\partial n_1}{\partial z} \rightarrow 0, \quad \frac{\partial n_2}{\partial z} \rightarrow 0, \quad \frac{\partial N_1^{(k)}}{\partial z} \rightarrow 0, \quad \frac{\partial N_2^{(k)}}{\partial z} \rightarrow 0, \quad B = \frac{2\eta_1\eta_2}{2\eta_2 + \eta_1}.$$

Система дифференциальных уравнений (1) с начальными и граничными условиями (2) – (4) представляет собой непрерывную модель. Для ее численного решения необходим переход к дискретной модели, который может быть осуществлен различными методами [10]:

## III. МЕТОДЫ ПЕРЕХОДА ОТ НЕПРЕРЫВНЫХ МОДЕЛЕЙ К ДИСКРЕТНЫМ

Для разработки численной модели используем метод конечных разностей, который предполагает собой замену всех частных производных, входящих в уравнения системы (1) их дискретными аналогами и является устойчивым.

Введем пространственно-временную сетку, рис. 1.

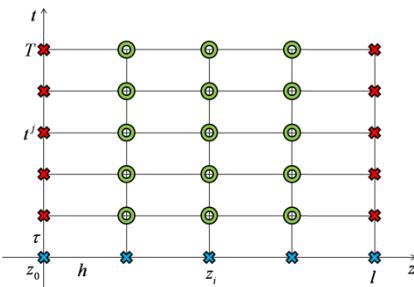


Рис. 1. Пространственно-временная сетка

$$\omega_{h,\tau} = \omega_h \times \omega_\tau = \left\{ \begin{array}{l} z_i = i \cdot h + z_0, \quad t^j = j \cdot \tau, \quad i = \overline{0..N_z}, \\ j = \overline{0..N_T}, \quad h \cdot N_z = l, \quad N_T \cdot \tau = T \end{array} \right\},$$

здесь  $i, j$  - индексы шагов по направлениям  $z, t; h, \tau$  - шаги по направлениям  $z, t; N_z, N_t$  - количество узлов сетки по направлениям  $z, t; l$  - толщина электродного слоя,  $T$  - время протекания электродинамических процессов в электродном слое.

Во всех уравнениях системы (1), с учетом начальных и граничных условий (2),(3) и (4), необходимо заменить непрерывные операторы, которые представлены в виде частных производных, на их конечно-разностные аналоги. Такие конечно-разностные получены при помощи интегро-интерполяционного метода [2].

Для аппроксимации уравнений системы (1) в точке  $(z_i, t^j)$  вводится 6 – точечный шаблон, представленный на рис. 2.

При подстановке полученных конечно-разностных аналогов вместо частных производных в уравнения системы (1) необходимо привести каждое уравнение к каноническому виду. В итоге получается явно-неявная схема, которая является полусуммой явной и неявной разностных схем.

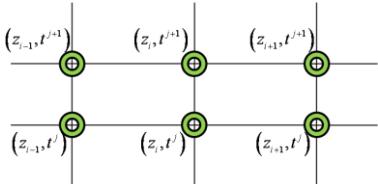


Рис. 2. Шаблон дискретизации

Запишем конечно-разностные аналоги непрерывных операторов для уравнений системы:

- конечно-разностный аналог для первой производной по временной переменной:

$$\int_{z_{i-1/2}}^{z_{i+1/2}} \int_{t'}^{t^{j+1}} \frac{\partial n_1}{\partial t} dt dz = \int_{z_{i-1/2}}^{z_{i+1/2}} \left( (n_1)_i^{j+1} - (n_1)_i^j \right) dz = h \left( (n_1)_i^{j+1} - (n_1)_i^j \right),$$

- конечно-разностный аналог для турбулентного перемешивания:

$$\begin{aligned} & \int_{t'}^{t^{j+1}} \int_{z_{i-1/2}}^{z_{i+1/2}} \frac{\partial}{\partial z} \left( D(z, t) \frac{\partial n_1}{\partial z} \right) dz dt = \\ & = \int_{t'}^{t^{j+1}} \left( D_{i+1/2} \left( \frac{\partial n_1}{\partial z} \right)_{i+1/2} - D_{i-1/2} \left( \frac{\partial n_1}{\partial z} \right)_{i-1/2} \right) dz dt = \\ & = \int_{t'}^{t^{j+1}} \left( D_{i+1/2} \frac{(n_1)_{i+1} - (n_1)_i}{h} - D_{i-1/2} \frac{(n_1)_i - (n_1)_{i-1}}{h} \right) dt = \\ & = \frac{\tau}{2 \cdot h} \left( D_{i+1/2}^{j+1} (n_1)_{i+1}^{j+1} - (D_{i+1/2}^{j+1} + D_{i-1/2}^{j+1}) \cdot (n_1)_i^{j+1} + D_{i-1/2}^{j+1} (n_1)_{i-1}^{j+1} + \right. \\ & \quad \left. + D_{i+1/2}^j (n_1)_{i+1}^j - (D_{i+1/2}^j + D_{i-1/2}^j) \cdot (n_1)_i^j + D_{i-1/2}^j (n_1)_{i-1}^j \right), \end{aligned}$$

- конечно-разностный аналог для переноса электрическим полем:

$$\begin{aligned} & \int_{t'}^{t^{j+1}} \int_{z_{i-1/2}}^{z_{i+1/2}} \frac{\partial}{\partial z} (b_1 \cdot n_1 \cdot E) dz dt = \\ & = b_1 \cdot \int_{t'}^{t^{j+1}} \left( (n_1 \cdot E)_{i+1/2} - (n_1 \cdot E)_{i-1/2} \right) dt = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & = \frac{b_1 \cdot \tau}{2} \left( (E \cdot n_1)_{i+1/2}^{j+1} + (E \cdot n_1)_{i+1/2}^j - (E \cdot n_1)_{i-1/2}^{j+1} - (E \cdot n_1)_{i-1/2}^j \right) = \\ & = \frac{b_1 \cdot \tau}{4} \left( (E \cdot n_1)_{i+1}^{j+1} - (E \cdot n_1)_{i-1}^{j+1} + (E \cdot n_1)_{i+1}^j - (E \cdot n_1)_{i-1}^j \right), \end{aligned}$$

- конечно-разностный аналог для рекомбинации объемных концентраций легких ионов:

$$\begin{aligned} & \int_{t'}^{t^{j+1}} \int_{z_{i-1/2}}^{z_{i+1/2}} \alpha \cdot n_1 \cdot n_2 dz dt = \\ & = \alpha h \tau \int_{t'}^{t^{j+1}} (n_1 \cdot n_2)_i dt = \frac{\alpha h \tau}{2} \left[ (n_1 \cdot n_2)_i^{j+1} + (n_1 \cdot n_2)_i^j \right] = \\ & = \frac{\alpha h \tau}{2} \left[ (n_1)_i^{j+1} \cdot (n_2)_i^{j+1} + (n_1)_i^j \cdot (n_2)_i^j \right], \end{aligned}$$

- конечно-разностный аналог для интенсивности ионообразования:

$$\int_{t'}^{t^{j+1}} \int_{z_{i-1/2}}^{z_{i+1/2}} (q(z, t)) dz dt = h \int_{t'}^{t^{j+1}} (q)_i dt = \frac{h \cdot \tau}{2} \left( (q)_i^{j+1} + (q)_i^j \right),$$

- конечно-разностный аналог для взаимодействия аэрозольных частиц с аэроионами:

$$\begin{aligned} & \int_{t'}^{t^{j+1}} \int_{z_{i-1/2}}^{z_{i+1/2}} n_1 \beta_{11}^{(1)} N_1 dz dt = \beta_{11}^{(1)} h \int_{t'}^{t^{j+1}} (n_1 \cdot N_1)_i dt = \\ & = \frac{\beta_{11}^{(1)} h \tau}{2} \left[ (n_1 \cdot N_1)_i^{j+1} + (n_1 \cdot N_1)_i^j \right] = \\ & = \frac{\beta_{11}^{(1)} h \tau}{2} \left[ (n_1)_i^{j+1} \cdot (N_1)_i^{j+1} + (n_1)_i^j \cdot (N_1)_i^j \right], \end{aligned}$$

- конечно-разностный аналог для первой производной по пространственной координате для поля:

$$\int_{z_{i-1/2}}^{z_{i+1/2}} \frac{\partial E}{\partial z} dz = (E)_{i+1/2} - (E)_{i-1/2} = \frac{1}{2} \left( (E)_{i+1} - (E)_{i-1} \right),$$

- конечно-разностный аналог для изменения объемных концентраций с высотой:

$$\int_{z_{i-1/2}}^{z_{i+1/2}} n_1 \cdot dz = h \cdot (n_1)_i.$$

Построив явно-неявную схему путем подстановки конечно-разностных аналогов в каждое уравнение системы (1), запишем ее в обобщенном виде через так называемое “семейство схем с весами”  $\sigma_{1,2} \in [0,1]$ :

- 1) При  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$  - схема является явной;
- 2) При  $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$  - схема является неявной;
- 3) При  $\sigma_1 = \sigma_2 = 1/2$  - симметричная схема,
- 4) При  $\sigma_1 \in [0,1], \sigma_2 = 0$  - Схема явно-неявная.

Все названные выше схемы объединены введением произвольных действительных параметров  $\sigma_{1,2} \in [0,1]$ .

Причем, если задать параметр  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$  получим явную схему, если задать  $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$ , получим неявную схему. Если задать параметр  $\sigma_1 = \sigma_2 = 1/2$  получаем симметричную схему (схему Кранка-Николсона), а при  $\sigma_1 \in [0,1], \sigma_2 = 0$  - явно-неявную схему. Если на первом этапе решается неявная схема с параметром ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$ ) на полуслое (линейная система уравнений), затем на втором этапе решается явно-неявная схема с параметром ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 1/2$ ) на слое (нелинейная система уравнений), при этом нелинейные коэффициенты вычисляются

с использованием полученных на первом этапе значений на полуслобе, то получаем схему “Предиктор-корректор” [4].

Для записи системы уравнений (1) с начальными и граничными условиями (2), (3) и (4) в конечно-разностном виде используется двухпараметрическое семейство схем с весами [3].

Тем самым осуществляется переход от непрерывного вида задачи (1) к дискретному, который в индексной форме, с учетом полученных ранее аппроксимаций, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & (\mathbf{N}_0)_i^{j+1} + \sum_{k=1}^m (\mathbf{N}_1^{(k)})_i^{j+1} + \sum_{k=1}^m (\mathbf{N}_2^{(k)})_i^{j+1} = \mathbf{N} = \text{const}, \\
 & \frac{(\mathbf{N}_1^{(k)})_i^{j+1} - (\mathbf{N}_1^{(k)})_i^j}{\tau} + \\
 & + \sigma_1 \left[ - \left( \chi_{i+\frac{1}{2}}^{j+1} \left( \frac{(\mathbf{N}_1^{(k)})_{i+1}^{j+1} - (\mathbf{N}_1^{(k)})_i^{j+1}}{h^2} \right) - \chi_{i-\frac{1}{2}}^{j+1} \left( \frac{(\mathbf{N}_1^{(k)})_i^{j+1} - (\mathbf{N}_1^{(k)})_{i-1}^{j+1}}{h^2} \right) \right) + \right. \\
 & \left. + \beta_{21}^{(k)} \cdot (\mathbf{N}_1^{(k)})_i^{j+1} \cdot (\mathbf{n}_2)_i^{j+1} \right) + \\
 & + (1 - \sigma_1) \left[ - \left( \chi_{i+\frac{1}{2}}^j \left( \frac{(\mathbf{N}_1^{(k)})_{i+1}^j - (\mathbf{N}_1^{(k)})_i^j}{h^2} \right) - \chi_{i-\frac{1}{2}}^j \left( \frac{(\mathbf{N}_1^{(k)})_i^j - (\mathbf{N}_1^{(k)})_{i-1}^j}{h^2} \right) \right) + \right. \\
 & \left. + \beta_{21}^{(k)} \cdot (\mathbf{N}_1^{(k)})_i^j \cdot (\mathbf{n}_2)_i^j \right) = \\
 & = \sigma_1 \cdot \left( \beta_{11}^{(k-1)} \cdot (\mathbf{N}_1^{(k-1)})_i^{j+1} \cdot (\mathbf{n}_1)_i^{j+1} \right) + (1 - \sigma_1) \cdot \left( \beta_{11}^{(k-1)} \cdot (\mathbf{N}_1^{(k-1)})_i^j \cdot (\mathbf{n}_1)_i^j \right), \\
 & \frac{(\mathbf{N}_2^{(k)})_i^{j+1} - (\mathbf{N}_2^{(k)})_i^j}{\tau} + \\
 & + \sigma_1 \left[ - \left( \chi_{i+\frac{1}{2}}^{j+1} \left( \frac{(\mathbf{N}_2^{(k)})_{i+1}^{j+1} - (\mathbf{N}_2^{(k)})_i^{j+1}}{h^2} \right) - \chi_{i-\frac{1}{2}}^{j+1} \left( \frac{(\mathbf{N}_2^{(k)})_i^{j+1} - (\mathbf{N}_2^{(k)})_{i-1}^{j+1}}{h^2} \right) \right) + \right. \\
 & \left. + \beta_{12}^{(k)} \cdot (\mathbf{N}_2^{(k)})_i^{j+1} \cdot (\mathbf{n}_1)_i^{j+1} \right) + \\
 & + (1 - \sigma_1) \left[ - \left( \chi_{i+\frac{1}{2}}^j \left( \frac{(\mathbf{N}_2^{(k)})_{i+1}^j - (\mathbf{N}_2^{(k)})_i^j}{h^2} \right) - \chi_{i-\frac{1}{2}}^j \left( \frac{(\mathbf{N}_2^{(k)})_i^j - (\mathbf{N}_2^{(k)})_{i-1}^j}{h^2} \right) \right) + \right. \\
 & \left. + \beta_{12}^{(k)} \cdot (\mathbf{N}_2^{(k)})_i^j \cdot (\mathbf{n}_1)_i^j \right) = \\
 & = \sigma_1 \cdot \left( \beta_{22}^{(k-1)} \cdot (\mathbf{N}_2^{(k-1)})_i^{j+1} \cdot (\mathbf{n}_2)_i^{j+1} \right) + (1 - \sigma_1) \cdot \left( \beta_{22}^{(k-1)} \cdot (\mathbf{N}_2^{(k-1)})_i^j \cdot (\mathbf{n}_2)_i^j \right), \\
 & \frac{(\mathbf{n}_1)_i^{j+1} - (\mathbf{n}_1)_i^j}{\tau} + \\
 & + \sigma_1 \left[ b_1 \frac{E_{i+1}^{j+1} (\mathbf{n}_1)_{i+1}^{j+1} - E_{i-1}^{j+1} (\mathbf{n}_1)_{i-1}^{j+1}}{2h} - \left( D_{i+\frac{1}{2}}^{j+1} \left( \frac{(\mathbf{n}_1)_{i+1}^{j+1} - (\mathbf{n}_1)_i^{j+1}}{h^2} \right) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - D_{i-\frac{1}{2}}^{j+1} \left( \frac{(\mathbf{n}_1)_i^{j+1} - (\mathbf{n}_1)_{i-1}^{j+1}}{h^2} \right) \right) \right] + \alpha \cdot (\mathbf{n}_1)_i^{j+1} \cdot (\mathbf{n}_2)_i^{j+1} + \\
 & + (\mathbf{n}_1)_i^{j+1} \cdot \sum_{k=0}^{m-1} \beta_{11}^{(k)} \cdot (\mathbf{N}_1^{(k)})_i^{j+1} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + (\mathbf{n}_1)_i^{j+1} \cdot \sum_{k=0}^m \beta_{12}^{(k)} \cdot (\mathbf{N}_2^{(k)})_i^{j+1} \Big) + \\
 & + (1 - \sigma_1) \left( b_1 \frac{E_{i+1}^j (\mathbf{n}_1)_{i+1}^j - E_{i-1}^j (\mathbf{n}_1)_{i-1}^j}{2h} - \left( D_{i+\frac{1}{2}}^j \left( \frac{(\mathbf{n}_1)_{i+1}^j - (\mathbf{n}_1)_i^j}{h^2} \right) - D_{i-\frac{1}{2}}^j \left( \frac{(\mathbf{n}_1)_i^j - (\mathbf{n}_1)_{i-1}^j}{h^2} \right) \right) \right) + \\
 & + \alpha \cdot (\mathbf{n}_1)_i^j \cdot (\mathbf{n}_2)_i^j + (\mathbf{n}_1)_i^j \cdot \sum_{k=0}^{m-1} \beta_{11}^{(k)} \cdot (\mathbf{N}_1^{(k)})_i^j + (\mathbf{n}_1)_i^j \cdot \sum_{k=0}^m \beta_{12}^{(k)} \cdot (\mathbf{N}_2^{(k)})_i^j = \\
 & = \sigma_1 q_i^{j+1} + (1 - \sigma_1) q_i^j, \\
 & \frac{(\mathbf{n}_2)_i^{j+1} - (\mathbf{n}_2)_i^j}{\tau} + \sigma_1 \left( -b_2 \frac{E_{i+1}^{j+1} (\mathbf{n}_2)_{i+1}^{j+1} - E_{i-1}^{j+1} (\mathbf{n}_2)_{i-1}^{j+1}}{2h} - \left( D_{i+\frac{1}{2}}^{j+1} \left( \frac{(\mathbf{n}_2)_{i+1}^{j+1} - (\mathbf{n}_2)_i^{j+1}}{h^2} \right) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - D_{i-\frac{1}{2}}^{j+1} \left( \frac{(\mathbf{n}_2)_i^{j+1} - (\mathbf{n}_2)_{i-1}^{j+1}}{h^2} \right) \right) \right) + \alpha \cdot (\mathbf{n}_2)_i^{j+1} \cdot (\mathbf{n}_1)_i^{j+1} + \\
 & + (\mathbf{n}_2)_i^{j+1} \cdot \sum_{k=0}^{m-1} \beta_{22}^{(k)} \cdot (\mathbf{N}_2^{(k)})_i^{j+1} + \\
 & + (\mathbf{n}_2)_i^{j+1} \cdot \sum_{k=0}^m \beta_{21}^{(k)} \cdot (\mathbf{N}_1^{(k)})_i^{j+1} + \\
 & + (1 - \sigma_1) \left( -b_2 \frac{E_{i+1}^j (\mathbf{n}_2)_{i+1}^j - E_{i-1}^j (\mathbf{n}_2)_{i-1}^j}{2h} - \left( D_{i+\frac{1}{2}}^j \left( \frac{(\mathbf{n}_2)_{i+1}^j - (\mathbf{n}_2)_i^j}{h^2} \right) - D_{i-\frac{1}{2}}^j \left( \frac{(\mathbf{n}_2)_i^j - (\mathbf{n}_2)_{i-1}^j}{h^2} \right) \right) \right) + \\
 & + \alpha \cdot (\mathbf{n}_2)_i^j \cdot (\mathbf{n}_1)_i^j + (\mathbf{n}_2)_i^j \cdot \sum_{k=0}^{m-1} \beta_{22}^{(k)} \cdot (\mathbf{N}_2^{(k)})_i^j + (\mathbf{n}_2)_i^j \cdot \sum_{k=0}^m \beta_{21}^{(k)} \cdot (\mathbf{N}_1^{(k)})_i^j \Big) = (4) \\
 & = \sigma_1 q_i^{j+1} + (1 - \sigma_1) q_i^j,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{E_i^{j+1} - E_{i-1}^{j+1}}{h} = \\
 & = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \left( (\mathbf{n}_1)_i^{j+1} - (\mathbf{n}_2)_i^{j+1} + \sum_{k=1}^m k (\mathbf{N}_1^{(k)})_i^{j+1} - \sum_{k=1}^m k (\mathbf{N}_2^{(k)})_i^{j+1} \right).
 \end{aligned}$$

Все уравнения системы (4) рассчитываются последовательно на каждом временном шаге.

#### IV. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ

Для оценки порядка погрешности аппроксимации модели, основанной:

– на неявных схемах ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$ ), разложим уравнения по формуле Тейлора [2] относительно узла  $(i, j+1)$ , уравнения имеют одинаковый порядок погрешности аппроксимации  $O(\tau + h^2)$ ;

– на симметричных схемах ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 1/2$ ) разложим по формуле Тейлора относительно узла  $(i, j+1/2)$  с учетом замены  $(j+1)$  на  $(j+1/2)$ . Здесь уравнения имеют одинаковый порядок погрешности аппроксимации  $O(\tau^2 + h^2)$ .

В схеме “Предиктор-корректор” переход со слоя  $(j)$  на слой  $(j+1)$  состоит из двух этапов.

На первом этапе решается неявная линейная система уравнений при  $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$ . При этом осуществляется переход со слоя  $(j)$  на слой  $(j+1/2)$  и находятся промежуточные значения на слое  $(j+1/2)$ . Уравнения в этом случае имеют порядок погрешности аппроксимации  $O(\tau + h^2)$ .

На втором этапе решается явно-неявная нелинейная система уравнений при  $\sigma_1 = \sigma_2 = 1/2$ . При этом осуществляется переход со слоя  $(j)$  на слой  $(j+1)$ . Нелинейные коэффициенты вычисляются с использованием полученных на первом этапе значений со слоя  $(j+1/2)$ . Уравнения в этом случае имеют порядок погрешности аппроксимации  $O(\tau^2 + h^2)$ .

Таким образом, получен окончательный одинаковый порядок погрешности аппроксимации, а именно  $O(\tau^2 + h^2)$ .

Порядок погрешности аппроксимации для приведенных выше конечно-разностных схем представлен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1

Конечно-разностная схема	Порядок погрешности аппроксимации
Неявная схема ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$ )	$O(\tau + h^2)$
Симметричная схема $(\sigma_1 = \sigma_2 = 1/2)$	$O(\tau^2 + h^2)$
Схема “Предиктор-корректор”	

Для проверки устойчивости необходимо выяснить, при каких условиях численная схема является устойчивой, то есть непрерывно зависит от входных данных.

Рассмотрим случай, когда  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$

Необходимо представить уравнения в операторном виде, где оператор  $A$  имеет следующую структуру

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & -a_{12} & 0 & \dots \\ -a_{21} & a_{22} & -a_{23} & \dots \\ 0 & -a_{32} & a_{33} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \ddots \end{pmatrix},$$

и привести их к каноническому виду. Оператор положительно определен, что следует из положительности всех коэффициентов по главной диагонали, и выполнения условия диагонального преобладания. Отсюда следует абсолютная устойчивость разностной схемы к входным данным при  $\sigma_{1,2} \geq 0,5$ .

Для проверки консервативности дискретной модели на основе двухпараметрических схем с весами необходимо просуммировать все слагаемые уравнений. Очевидно, что все законы сохранения выполняются, следовательно, дискретная модель является консервативной.

## V. СРАВНЕНИЕ РАССМОТРЕННЫХ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ

Известно, что при численном решении задач на установлении наиболее целесообразным считается использование неявных схем ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$ ). Так как именно неявные схемы обладают наибольшим запасом устойчивости и монотонности.

Но при решении нестационарных задач, необходимо ориентироваться на явно-неявные ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 1/2$ ) схемы, которые обладают меньшей погрешностью аппроксимации по временной переменной, в отличие от неявных схем.

Всеми достоинствами рассмотренных выше схем обладает схема “Предиктор-корректор”: на первом этапе решается неявная ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$ ) линейная система уравнений на полуслое; затем, на втором этапе, решается явно-неявная ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 1/2$ ) нелинейная система уравнений на слое, при этом нелинейные коэффициенты вычисляются с использованием полученных на первом этапе значений на полуслое.

Установлено опытным путем, что при малой концентрации аэрозольных частиц ( $N \leq 10^8 \text{ м}^{-3}$ ) более целесообразно использовать симметричную схему ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 1/2$ ).

Но в условиях увеличивающегося аэрозольного загрязнения ( $N > 10^9 \text{ м}^{-3}$ ) предпочтительней использовать схему “Предиктор-корректор” второго порядка точности. Это происходит вследствие значительного увеличения времени установления стационарной электрической структуры, симметричной схеме может не хватать запаса устойчивости, а неявной схеме ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$ ) не хватает точности. Данный факт подтвержден при сравнении результатов численного моделирования и накопленных экспериментальных данных [5], а также результатами работ известных математических моделей электрической структуры приземного слоя атмосферы [6, 7].

Если задавать значения коэффициента конвективного переноса не более 0,1 м/с (незначительный конвективный перенос), то достаточно использовать рассмотренные выше схемы при ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ ).

В случае сильного конвективного переноса (более 0,1 м/с) следует применять в численном моделировании явно-неявные схемы ( $\sigma_1 \in [0,1]$ ,  $\sigma_2 = 0$ ), в которых конвективный перенос берется с нижнего временного слоя [3], так как они являются абсолютно устойчивыми при  $\sigma_1 \geq 0,5$ .

Уравнения дискретной системы, с учетом начальных и граничных условий имеют одинаковый порядок погрешности аппроксимации, который при  $\sigma_1 = 1$  равен  $O(\tau + h^2)$ , а при  $\sigma_1 = 1/2$  равен  $O(\tau^2 + h^2)$ .

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты исследования численного моделирования разработанной электродинамической модели, исследованы погрешность аппроксимации, устойчивость и консервативность. Установлено, что схема с двумя весовыми параметрами абсолютно устойчива по начальным данным и является консервативной.

В результате численного моделирования установлено, что исследованный алгоритм численного решения нестационарных электродинамических уравнений на основе двухпараметрического семейства схем с весами, обеспечивающий выполнение законов сохранения на дискретном уровне и устойчивость относительно начальных и граничных данных является эффективным инструментом математического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов В.Н. Атмосферное электричество // Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – С. 394-408.
2. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. - Таганрог: Изд-во ТРГУ, 1998. - 123 с.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 831 с.
4. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы математической физики. – 2-е изд. - М.: Научный мир, 2003. - 316 с.
5. Куповых Г.В., Марченко А.Г., Морозов В.Н. Электрическая структура нестационарного приземного слоя в приближении классического электродного эффекта // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки, Приложение – 2005. – № 4. С. 31–37.
6. Куповых Г.В., Марченко А.Г., Морозов В.Н. Электрическая структура нестационарного приземного слоя в приближении турбулентного электродного эффекта // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки, Приложение. – 2005. – № 5. – С. 46-51.
7. Редин А.А., Клево А.Г., Куповых Г.В. Математическое моделирование электродинамической структуры приземного слоя атмосферы в условиях аэрозольного загрязнения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 7 (96). – С. 192-200.
8. Редин А.А. Математическая модель электродинамики атмосферного приземного слоя с учетом одно- и двукратно заряженного аэрозоля // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 6 (107). – С. 84-89.
9. Белоусова О.В. Влияние турбулентного перемешивания и ионизации воздуха на структуру приземного электродного слоя атмосферы // Сборник трудов VIII Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности». – Таганрог, 2022. – С. 228-231.
10. Самарский А.А. Теория разностных схем. - М.: Наука, 1989.

# Математическая модель динамики снежных лавин на основе клеточных автоматов

Болгов Юрий Владиславович  
Высокогорный геофизический институт  
Нальчик, Россия  
*yuriy6601@mail.ru*

**Аннотация.** Представлено описание разработанной трехмерной модели движения лавин на основе клеточных автоматов. Приведены предварительные результаты моделирования движения лавины применительно к реальному рельефу местности лавиноопасного участка на территории горнолыжного курорта Приэльбрусье.

**Abstract.** A description of the developed three-dimensional model of avalanche motion based on cellular automata is given. Preliminary results of avalanche modeling in relation to the real terrain of an avalanche-prone area on the territory of the Elbrus ski resort are presented.

**Ключевые слова:** снежная лавина; математическое моделирование; клеточные автоматы.

**Keywords:** snow avalanche; mathematical modeling; cellular automata.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Расширение освоения горных районов России и как следствие, увеличение риска снежных лавин приводят к росту требований к концептуальным инструментам для правильного планирования инфраструктуры и проектирования безопасных сооружений. Организации, занимающиеся проблемами, связанными с лавинной опасностью, нуждаются помимо качественных оценок гидрологических и геоморфологических условий участков, в количественных методах для предсказания схода лавин и оценки последствий. Такие прогнозы как правило основываются на математических моделях движения снежных масс, но из-за сложности явления все еще нет однозначного решения данной проблемы [1].

Основными динамическими характеристиками снежной лавины принято считать: скорость переднего фронта; дальность выброса; силу удара лавины о препятствие; объем. Все перечисленные характеристики изменяются в зависимости от физико-географических условий. Моделирование движения лавин является в общем случае трехмерной задачей, но в большинстве существующих математических моделей рассматривается двухмерный случай [2], это допущение является вынужденной мерой для сокращения объема вычислений. Хотя во многих случаях этот подход приемлем, при сложном рельефе местности траектория лавины не может быть предсказана тривиальным образом, а должна быть рассчитана на основе математического моделирования. В классе моделей, учитывающих реальный рельеф местности наибольшее распространение, получила модель и программное обес-

печеие RAMMS разработанная в WSL-SLF в Давосе (Швейцария) [3, 4]. Данная модель основывается на численном решении уравнений Навье-Стокса и относится к квазитрехмерным (двумерная модель с осреднением параметров потока по высоте), при этом движение лавины рассматривается как неустановившееся и неравномерное с разной средней скоростью и высотой потока.

При моделировании динамики лавин с использованием традиционного подхода – численного решения уравнений Навье-Стокса в различных модификациях, возникают трудности с моделированием турбулентного потока, вычислительной сложностью, что стимулирует поиск альтернативных методов, адаптированных для компьютерной реализации. В последнее время большое распространение получили клеточно-автоматные методы моделирования [5], которые привлекают своей простотой, универсальностью, и естественным параллелизмом. В работе [6] впервые использована двухмерная модель клеточных автоматов для расчета динамики движения лавин. Лавиноопасный участок делился на небольшие элементы (клетки или элементарные автоматы), взаимодействующие по простым законам. Каждая клетка характеризовалась своей высотой: не разрушаемая высота (т.е. высота поверхности земли), разрушающая высота (т.е. слой снежного покрова), высота потока, сосредоточенная кинетическая энергия (т.е. высота, соответствующая кинетической энергии на единицу массы материала снега, связанной с клеткой). Из каждой ячейки поток мог перейти на соседние клетки, что приводило к изменению их высоты. Для того, чтобы представить модель как можно более простой, использовался двухмерный клеточный автомат, в котором клетки охватывают горизонтальные области, содержащие вертикальную проекцию зон, потенциально вовлеченных в лавину. К недостаткам подобных моделей относиться невозможность расчета профиля распределения параметров по высоте, рассматривается движение только плотной составляющей лавины, без учета пылевой компоненты и вовлечения воздушных масс в процесс движения.

## II. ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Далее приводится описание разработанной в Высокогорном геофизическом институте трехмерной модели движения лавин на основе клеточных автоматов. В качестве схемы соседства, в разработанной модели принятая окрестность Неймана, т.е. для трехмерного случая у каж-

дой клетки есть только шесть соседних клеток. На рис. 1 показана окрестность Неймана и координаты клеток (для упрощения показан двухмерный случай – клетки по оси Z не показаны).

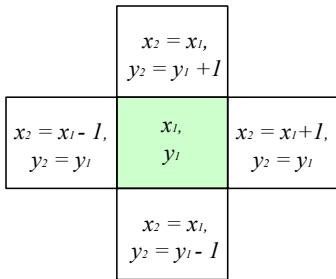


Рис. 1. Окрестность Неймана и координаты клеток

Каждая клетка содержит набор элементов – свойств:

1. Геометрические размеры клетки – горизонтальная область – квадрат со стороной  $l_{\text{клетки}}$  (далее при моделировании использован квадрат размером 5х5 метров), высота клетки  $h_{\text{клетки}}$  (при моделировании принималась равной 0,1 м). Данный выбор геометрии клетки связан с особенностью лавин – область моделирования может иметь значительные размеры в плане при относительно небольшой высоте потока над поверхностью рельефа.

2. Скорость потока в клетке, включая модуль вектора скорости  $V$  (м/с) и компоненты скорости  $V_x, V_y, V_z$  по осям координат  $X, Y, Z$  (могут принимать как положительные, так и отрицательные значения, в зависимости от направления относительно осей координат).

3. Индексы клетки –  $i_x, i_y, i_z$  (безразмерные параметры) по осям координат  $X, Y, Z$ , служат для идентификации положения конкретной клетки в пространстве моделирования.

4. Плотность и масса материала в клетке –  $\rho$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ),  $m$  (кг) включает воздух и снег.

5. Давление в клетке –  $P$  (Па).

6. Коэффициенты, входящие в уравнения, описывающие взаимодействие клеток –  $k$  ( $\text{Па}\cdot\text{с}/\text{м}$ ),  $\gamma$  ( $\text{м}/(\text{Па}\cdot\text{с})$ ),  $\eta$  и  $\mu$  (безразмерные коэффициенты).

7. Углы уклона  $\alpha$  и  $\beta$  по осям  $X$  и  $Y$  – имеют положительное значение если уклон направлен в сторону возрастания координаты по оси и отрицательное в противном случае. Для клеток, примыкающих к поверхности рельефа углы уклона определялись по данным цифровой модели рельефа местности.

8. Набор логических переменных, определяющих возможность перемещения потока в заданном направлении, рассчитываются на начальном этапе моделирования – для клеток, примыкающих к рельефу определяем грани, через которые перетекание материала запрещено.

Клеточно-автоматное взаимодействие между двумя клетками, заключается в модификации значений соответствующих свойств клеток согласно следующим уравнениям:

$$P'_1 = P_1 + k \left( (i_{x1} - i_{x2})(V_{x2} - V_{x1}) + (i_{y1} - i_{y2})(V_{y2} - V_{y1}) + iz1 - iz2Vz2 - Vz1 \right). \quad (1)$$

$$V'_{x1} = V_{x1} + \gamma(i_{x1} - i_{x2})(P_2 - P_1 + \Delta P_{x2}) + \eta(i_{x2} - i_{x1})(V_{x2} - V_{x1}); \quad (2)$$

$$\Delta P_{x2} = m_2 g \cos(\alpha_2) (\sin|\alpha_2| - \mu \cos(\alpha_2)) / S_b;$$

если  $(\sin|\alpha_2| - \mu \cos(\alpha_2)) < 0 \rightarrow \Delta P_{x2} = 0$  ;

если  $\alpha_2 < 0 \rightarrow \Delta P_{x2} = -\Delta P_{x2}$  .

$$V'_{y1} = V_{y1} + \gamma(i_{y1} - i_{y2})(P_2 - P_1 + \Delta P_{y2}) + \eta(i_{y2} - i_{y1})(V_{y2} - V_{y1}); \quad (3)$$

$$\Delta P_{y2} = m_2 g \cos(\beta_2) (\sin|\beta_2| - \mu \cos(\beta_2)) / S_b;$$

если  $(\sin|\beta_2| - \mu \cos(\beta_2)) < 0 \rightarrow \Delta P_{y2} = 0$  ;

если  $\beta_2 < 0 \rightarrow \Delta P_{y2} = -\Delta P_{y2}$  .

$$V'_{z1} = V_{z1} + \gamma(i_{z1} - i_{z2})(P_2 - P_1 - \Delta P_{z1}) + \eta(i_{z2} - i_{z1})(V_{z2} - V_{z1}); \quad (4)$$

$$\Delta P_{z1} = m_1 g / S_p.$$

$$m'_1 = m_1 + \left( ((i_{x2} - i_{x1})(V_{x2} - V_{x1}) + (i_{y2} - i_{y1})(V_{y2} - V_{y1})) S_b + iz2 - iz1Vz2 - Vz1S_p \right) \Delta t; \quad (5)$$

$$\rho = m_1 / W. \quad (6)$$

где  $i_x, i_y, i_z$  – индексы клетки; цифры 1 и 2 в нижних индексах указывают на параметры относящиеся к расчетной и соседней клетке соответственно; знак «'» в верхнем индексе параметров указывает на значения в моменты расчета  $t + \Delta t$ ;  $\alpha, \beta$  – углы уклона поверхности в направлениях осей  $X$  и  $Y$ ;  $\rho$  – плотность материала клетки ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $S_b$  – площадь боковой грани ячейки ( $\text{м}^2$ );  $S_p$  – площадь грани ячейки в плане ( $\text{м}^2$ );  $\Delta t$  – шаг вычислений (с);  $W$  – объем клетки ( $\text{м}^3$ );  $\mu$  – коэффициент трения;  $k, \gamma, \eta$  – коэффициенты пропорциональности, которые отражают пространственно-временные параметры клеточно-автоматной модели, а также кинематическую вязкость.

Смысл коэффициента  $k$  состоит в определении интенсивности изменения давления при различных значениях скорости потока вещества во взаимодействующих клетках. Коэффициент  $\gamma$  определяет интенсивность изменения компонентов векторов скоростей пропорционально давлению в двух соседних клетках. Коэффициент  $\eta$  определяет интенсивность «диффузии скорости», то есть является клеточно-автоматным отображением кинематической вязкости. Следует отметить, что разность индексов  $i_x, i_y, i_z$  двух соседних клеток в уравнениях принимают одно из значений -1, 0, +1.

Уравнения (1)–(6) описывают изменение значений соответствующих ячеек во время одного элементарного взаимодействия клеточных автоматов. Первое уравнение отображает изменение давления  $P$  при взаимодействии соседних клеток. Если рассматривать две клетки как некий небольшой фрагмент системы, то в первом приближении можно считать, что изменение давления пропорционально разности векторов скоростей. Механизм взаимодействия поясним на примере расчета изменения давления для оси  $X$ . В этом случае уравнение (1) имеет вид:

$$P' = P + \Delta P = P' + k(i_{x1} - i_{x2})(V_{x2} - V_{x1}). \quad (7)$$

Схема взаимодействия клетки с индексом  $i$  с клеткой  $(i + 1)$  – взаимодействие с клеткой имеющей больший индекс показано на рис. 2.

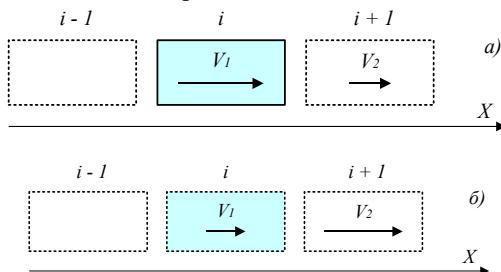


Рис. 2. Схема взаимодействия соседних клеток

Определим знак изменения давления в расчетной клетке при различных соотношениях модулей векторов скорости. Для схемы взаимодействия соседних клеток показанной на рис. 2,а):

$$V_1 > 0; V_2 > 0; |V_1| > |V_2|; \Delta P = k(-1)(V_2 - V_1) = k(-1)(-\Delta V) > 0. \quad (8)$$

Для схемы, показанной на рис. 2,б):

$$V_1 > 0; V_2 > 0; |V_1| < |V_2|; \Delta P = k(-1)(V_2 - V_1) = k(-1)(\Delta V) < 0. \quad (9)$$

Уравнения со второго по четвертые определяют изменение компонент вектора скорости потока в зависимости от соотношений скоростей и давлений во взаимодействующих клетках. Поясним это на упрощенном примере (рассмотрим только ось  $X$ ). Из общего уравнения (2) выделим составляющую изменения вектора скорости за счет разности давления во взаимодействующих клетках (без учета  $\Delta P_{x2} = m_2 g \cos(\alpha_2) (\sin|\alpha_2| - \mu \cos(\alpha_2)) / S_b$ ):

$$\Delta V_x = \gamma(i_{x1} - i_{x2})(P_2 - P_1). \quad (10)$$

Определим знак изменения скорости в расчетной клетке при различных соотношениях давления. На рис. 3 показаны варианты взаимодействия клеток при разных соотношениях давления в клетках.

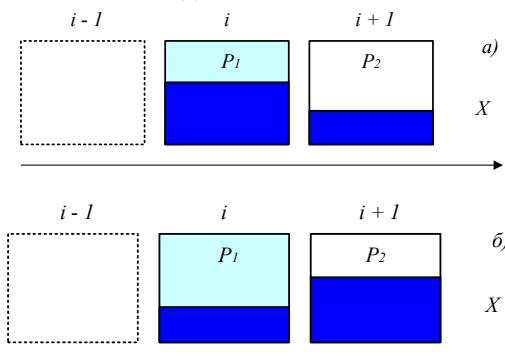


Рис. 3. Схема взаимодействия соседних клеток

Для схемы взаимодействия соседних клеток показанной на рис. 3,а):

$$P_1 > P_2; \Delta V_x = \gamma(i_{x1} - i_{x2})(P_2 - P_1) = \gamma(-1)(-\Delta P) > 0. \quad (11)$$

Для схемы взаимодействия соседних клеток показанной на рис. 3,б):

$$P_1 < P_2; \Delta V_x = \gamma(i_{x1} - i_{x2})(P_2 - P_1) = \gamma(-1)(\Delta P) < 0. \quad (12)$$

Пятое уравнение системы определяет изменение массы материала в ячейке, шестое служит для расчета плотности материала в клетке.

Изменение параметров клеток можно представить в виде соотношения  $c' = c + \Delta c$ . Очевидно, что для обеспечения адекватности процесса моделирования прирост или уменьшение некоторого значения ячейки –  $\Delta c$  должно быть как можно меньшей величиной, регулируемой коэффициентами  $k, \gamma, \eta$  и параметром  $\Delta t$ , при этом размер клеточно-автоматного поля должен быть как можно большим. Данная математическая модель реализована в программном обеспечении [7], описание интерфейса программы представлено в [8].

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование проводилось применительно к реальному лавиноопасному участку на территории горнолыжного курорта Приэльбрусье – горнолыжная трасса Мир – Гара-Баши. Участок имеет общую протяженность 6,5 километров, перепад высот составляет около 1,5 километра. На участке трассы расположены четыре лавинных очага, высота зон зарождения лавин составляет 3530 – 3780 м. Фрагмент спутникового снимка для расчетного лавинного очага приведен на рис. 4, на котором отмечена зона зарождения лавин (положение маркера в центре имеет координаты 430° 18' 24" северной широты, 420° 27' 29" восточной долготы) и зона транзита.

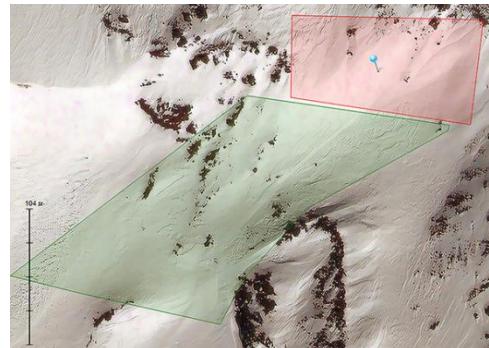


Рис. 4. Спутниковый снимок лавинного очага

По данным топографической съемки участка был построен трехмерный рельеф поверхности зоны зарождения лавин, размером 160x160 метров – 32x32 клетки в плане, при этом общее количество клеток с учетом вертикальных слоев составляло 58000. На рис. 5 показан каркас рельефа поверхности участка (в данном случае это снимок интерфейса разработанной программы для расчета движения лавин). Интерфейс программы позволяет отображать участок рельефа в виде каркаса или сплошной поверхности (рис. 6). Программа строит трехмерное изображение с возможностью поворота и масштабирования отображаемого участка. Клетки располагаются в узлах сетки каркаса. Каждый узел имеет вертикальную «стопку» из клеток, при этом нижняя клетка расположена на поверхности рельефа.

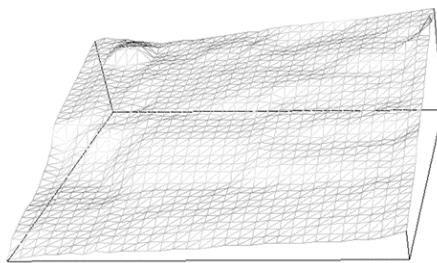


Рис. 5. Каркас рельефа поверхности

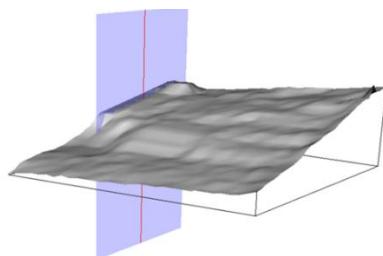


Рис. 6. Трехмерный рельеф поверхности

Моделирование проводилось при следующих начальных условиях: высота снежного покрова 50 см; плотность снега 125 кг/м<sup>3</sup>; давление в клетках 101325 Па; плотность воздуха 1,225 кг/м<sup>3</sup>, при следующих значениях коэффициентов, входящих в уравнения взаимодействия клеток:  $k = 100$  Па·с/м;  $\gamma = 0,00001$  м/(Па·с);  $\eta = 0,1$ ;  $\mu = 0,1$ ; шаг вычислений  $\Delta t = 0,1$  с.

На рис. 7 представлено распределение максимальных значений скорости потока по поверхности рельефа на 5-ом, 10-ом и 15-ом шаге моделирования.

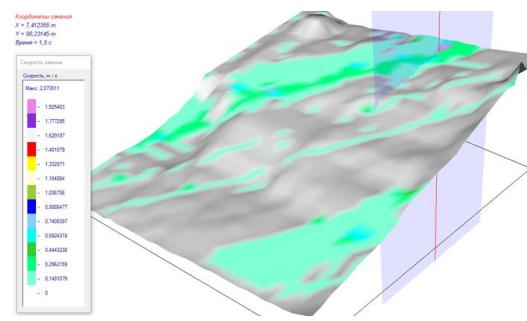
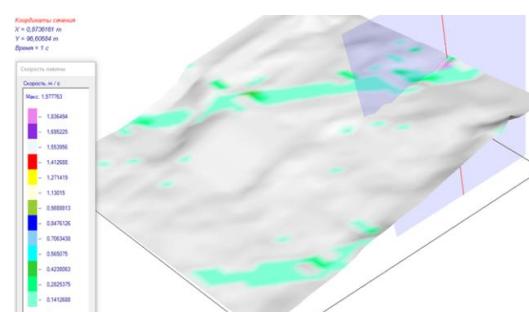
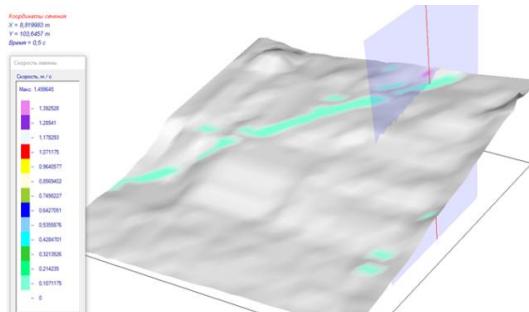


Рис. 7. Распределение максимальных значений скорости потока по поверхности рельефа на 5-ом, 10-ом и 15-ом шаге моделирования

На изображение трехмерного рельефа наложена цветовая градация распределения параметров, в данном случае это максимальное значение модуля вектора скорости потока и показана цветовая шкала градаций скорости, программа позволяет накладывать на рельеф и другие параметры – плотность, давление. Показанная на рисунках вертикальная плоскость задает сечение, вдоль которого строятся графики изменения параметров (плоскость можно смещать по поверхности рельефа). Координаты сечения соответствуют показанной на плоскости вертикальной линии, вдоль которой стоятся графики вертикального профиля распределения параметров.

На рис. 8 показано распределение максимальных значений скорости потока по поверхности рельефа на 14-ом шаге моделирования, а на рис. 9 показаны графики распределения параметров потока для положения плоскости показанной на рис. 8. На двух верхних графиках, а), б) представлен профиль рельефа местности, распределения максимальных значений скорости, давления и плотности потока. На двух нижних рисунках в), г) показаны профили вертикального распределения параметров: модуля вектора скорости  $V$ , его компонентов по осям, давления и плотности потока  $\rho$ .

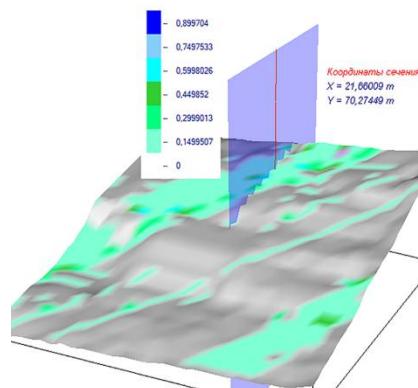


Рис. 8. Распределение максимальных значений скорости потока по поверхности рельефа на 14-ом шаге моделирования

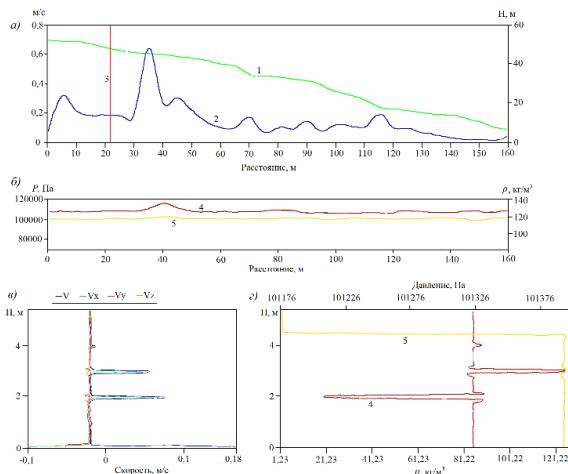


Рис. 9. Графики распределения параметров потока:  
 а) профиль максимального значения скорости (2) и профиль рельефа местности (1); б) распределение давления (4) и плотности (5); в) профили вертикального распределения (водоль линии (3) показанной на рис. а) вектора скорости  $V$  и его компонентов по осям  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ; г) профили вертикального распределения давления (4) и плотности (5) (водоль линии (3) на рис. а)

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Так, как в задачи данного этапа работ входило получение предварительных результатов, участок моделирования был ограничен зоной зарождения лавин. При размере расчетной области  $32 \times 32$  клетки в плане и общем количестве клеток 58000, время расчета для одного шага вычислений составляло около 15 минут. При этом время вычислений резко возрастает с увеличением размера расчетной области, что затрудняло проведение расчетов при подборе значений коэффициентов ( $k$ ,  $\gamma$ ,  $\eta$ ,  $\mu$ ), входящих в уравнения.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы. Начало движение снежной массы происходило сразу на нескольких участках рельефа, где скатывающая сила превышала силу трения, значения скоростей при этом были небольшие – около 0,1 м/с. По мере развития процесса сформировалось несколько потоков (рисунок 7), при этом максимальная скорость на отдельных участках увеличилась до 0,6 м/с. Из вертикального профиля распределения параметров (рисунок 9) следует, что компоненты вектора скорости принимают как положительные, так и отрицательные значения (относительно осей координат). Из графиков видно, что

процесс движения снежной массы носит сложный характер и напоминает вихревое течение. Направление потока на данном участке рельефа соответствует направлению схода реальных лавин.

Поведение моделируемого потока адекватно процессу схода лавин. Однако требуется проведение дальнейших исследований на более полном наборе исходных данных – сопоставлять результаты моделирования с измеренными параметрами реальных лавин (изменение скорости и высоты потока по времени) при реальных начальных условиях (плотности и распределению высоты снежного покрова на участке). В настоящее время ведется доработка программного обеспечения – перевод расчетов, связанных с клеточно-автоматным взаимодействием в режим параллельных вычислений с использование возможностей современных графических процессоров (с целью сокращения времени моделирования), использование в интерфейсе программы более современных методов трехмерной графики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Болгов Ю.В. Математическое моделирование динамики снежных лавин // Сборник научных трудов ВГИ, ООО «Аэтена». – Уфа, 2017. – С. 97-106.
2. Adzhiev A., Bekkiev M., Bolgov Yu., Senov Kh. Mathematical modeling in the calculation of the dynamic characteristics of snow avalanches // 2018 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS). 24– 28 Sept. 2018 Saint Petersburg, Russia. – P. 83-88. – DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8524975.
3. Christen M., Bartelt P., Kowalski J., Stoffel L. Calculation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain with the numerical simulation program RAMMS // 2008 Proceedings of the International Snow Science Workshop, September 21-27, Whistler (BC), 2008.
4. Christen M., Bartelt P., Kowalski J. Back calculation of the In den Arelen avalanche with RAMMS: interpretation of model results // Annals of Glaciology. – 2010. – 54 (51). – P. 161-168.
5. Тоффоли Т., Марголос Н. Машины клеточных автоматов. – М.: Мир, 1991.
6. Barpi F., Borri-Brunetto M., Veneri L.D. Cellular-automata model for dense-snow avalanches // Journal of Cold Regions Engineering. – 2007. – 21 (4). – P. 121-140.
7. Болгов Ю.В. RU2020618600 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа моделирования движения лавин «Aval\_HMGL». Дата регистрации 30.07.2020.
8. Болгов Ю.В. Использование клеточных автоматов для математического моделирования снежных лавин // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 8-10 сентября 2021 г. – Нальчик: Изд-во «Принт Центр», 2021. – С. 270-275.

# Параллельная модель решения класса задач обтекания сверхкритических крыловых профилей воздушным потоком

**Семенистый Владимир Васильевич**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
vlad60sem@gmail.com

**Гамолина Ирина Эдуардовна**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
iegamolina@sfedu.ru

**Аннотация.** Предлагается параллельная модель решения класса задач обтекания сверхкритических крыловых профилей воздушным потоком. Для исследования течений используется метод DNS решения полной системы уравнений Навье-Стокса. Последовательно-параллельный алгоритм решения задачи основан на параллельных прямых методах решения блочных ленточных систем алгебраических уравнений большой размерности. Для реализации алгоритма выбираются вычислительные структуры с распределенной памятью и перестраиваемой архитектурой. В работе исследованы характеристики построенного вычислительного процесса и выполнен расчет двухмерного обтекания сверхкритического крылового профиля в программном пакете ANSYS FLOTTRAN CFD.

**Abstract.** Problem of supercritical wing profiles air flow is discussed. The complete system of Navier-Stokes equations is used. The DNS method is used to study this system. The sequential-parallel algorithm is proposed for solving the problem. It is based on parallel direct methods and block tape algebraic equations systems of large dimension. The computing structures with distributed memory and tunable architecture are selected to implement the algorithm. The paper investigates the characteristics of the constructed computational process and calculates the two-dimensional flow around the supercritical wing profile in the ANSYS FLOTTRAN CFD software package.

**Ключевые слова:** уравнения Навье-Стокса, последовательно-параллельный алгоритм, задача обтекания крыловых профилей.

**Keywords:** Navier-Stokes equations, sequential-parallel algorithm, problem of supercritical wing profiles.

## I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для исследования течения возле сверхкритического крылового профиля используется метод прямого численного моделирования (DNS) начально-краевой задачи для полной системы уравнений Навье-Стокса

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -W, W = \sum_{j=1}^2 \frac{\partial W_j}{\partial x_j},$$

$$p = p(\rho, e), e = e(T). \quad (1)$$

Здесь

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho v_1 \\ \rho v_2 \\ E \end{pmatrix},$$

$$W_j = \begin{pmatrix} \rho v_j \\ \rho v_1 v_j + \delta_j^1 p - \sigma_{j1} \\ \rho v_2 v_j + \delta_j^2 p - \sigma_{j2} \\ \rho v_j \frac{v^2}{2} + v_j (\rho e + p) - k \frac{\partial T}{\partial x_j} \end{pmatrix},$$

$$\sigma_{ji} = [\mu + \delta_j^i (\mu + \lambda)] \frac{\partial v_i}{\partial x_j}.$$

Система записана в декартовых координатах. Для проведения расчетов течения возле профиля крыла, используется структурированная сетка С-типа (рис. 1).

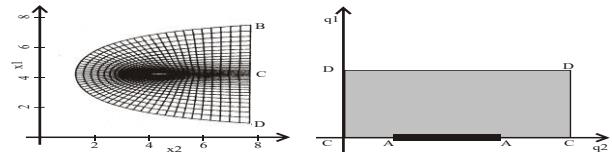


Рис. 1. Структурированная сетка

Введем невырожденное преобразование отображающие физическую область течения в расчетную математическую:  $q_j = q_j(x_1, x_2), j = 1, 2$ . Тогда система (1) записывается в новых переменных в дивергентной форме [1]:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} = -\bar{W}, \quad (2)$$

где

$$W = \sum_{j=1}^2 \frac{\partial W_j}{\partial x_j},$$

$$\bar{U} = \frac{U}{J},$$

$$\bar{W}_j = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} \rho V_j \\ \rho v_1 V_j + q_j^1 p - \bar{\sigma}_{j1} \\ \rho v_2 V_j + q_j^2 p - \bar{\sigma}_{j2} \\ \rho V_j \frac{v^2}{2} + V_j (\rho e + p) - Q_j - \bar{\sigma}_{j3} \end{pmatrix},$$

$$\begin{aligned}
 V_j &= \sum_{i=1}^2 q_j^i v_i, \\
 \bar{\sigma}_{jl} &= \sum_{m=1}^2 q_m^j \sigma_{lm}, \\
 Q_j &= k \sum_{l=1}^2 q_j^l \frac{\partial T}{\partial q_l} \\
 \bar{\sigma}_{j3} &= \sum_{l=1}^2 v_l \bar{\sigma}_{jl}, \\
 q_j^i &= \frac{\partial q_i}{\partial x_j}, \\
 q_j &= \sum_{m=1}^2 v_m \sigma_{jm}, \\
 \sigma_{ji} &= \delta_j^i \lambda \operatorname{div} V + \mu \sum_{l=1}^2 (q_i^l \frac{\partial v_j}{\partial q_l} + q_j^l \frac{\partial v_i}{\partial q_l}), \\
 \operatorname{div} V &= \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^2 q_j^l \frac{\partial v_j}{\partial q_l}, J = \det \begin{pmatrix} q_1^1 & q_1^2 \\ q_2^1 & q_2^2 \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

На поверхности тела ставятся условия прилипания для компонент вектора скорости и один из режимов теплообмена. На внешней границе задаются условия невозмущенного потока. На выходной границе - мягкие условия. Начальные условия параметров совпадают со значениями в невозмущенном потоке.

Для проведения расчетов представим систему (2) в недивергентном виде

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{j=1}^2 B_j f = F. \quad (3)$$

Если выбрать искомую вектор-функцию в переменных  $f = (\rho, v_1, v_2, p)$ , матричный оператор будет иметь следующий вид

$$B_j = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial q_j} V_j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_j \frac{\partial}{\partial q_j} - d_j^1 & 0 & a_j^1 \frac{\partial}{\partial q_j} \\ 0 & 0 & V_j \frac{\partial}{\partial q_j} - d_j^2 & a_j^2 \frac{\partial}{\partial q_j} \\ 0 & c_j^1 \frac{\partial}{\partial q_j} & c_j^2 \frac{\partial}{\partial q_j} & V_j \frac{\partial}{\partial q_j} - d_j^3 \end{pmatrix},$$

$$a_j^1 = \frac{1}{\rho} q_j^l, \quad c_j^l = \gamma p q_j^l,$$

$$d_j^l = \frac{1}{\rho} \sum_{m=1}^2 q_m^j \frac{\partial}{\partial q_j} b_m^j q_m^j \frac{\partial}{\partial q_j},$$

$$d_j^3 = \sum_{m=1}^2 q_m^j \frac{\partial}{\partial q_j} k q_m^j \frac{\partial}{\partial q_j} \frac{1}{\rho},$$

$$b_j^l = \mu + \delta_j^l (\mu + \lambda).$$

## II. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Для численного решения системы (3) воспользуемся схемой с весами

$$\frac{f^{n+1} - f^n}{\tau} + \sum_{j=1}^2 B_j (\alpha f^{n+1} + \beta f^n) = F^n. \quad (4)$$

или эквивалентной ей схемой в каноническом виде

$$\begin{aligned}
 &\left( I + \tau \alpha \sum_{j=1}^2 B_j \right) \frac{f^{n+1} - f^n}{\tau} = \\
 &= - \sum_{j=1}^2 B_j (\alpha f^n + \beta f^{n+1}) + F^n = - A^{-1} J \bar{W}^n.
 \end{aligned}$$

Матричные операторы схемы

$$B_j = \begin{pmatrix} \Lambda_j V_j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_j \Lambda_j - d_j^1 & 0 & a_j^1 \bar{\Lambda}_j \\ 0 & 0 & V_j \Lambda_j - d_j^2 & a_j^2 \bar{\Lambda}_j \\ 0 & c_j^1 \Lambda_j & c_j^2 \Lambda_j & V_j \Lambda_j - d_j^3 \end{pmatrix}$$

аппроксируют дифференциальные операторы; их вид в новых переменных подобен виду в декартовых координатах.

Схема (4) реализуется методом матричной прогонки. Для этого уравнения схемы представим в виде

$$A_j u_{j-1} + C_j u_j + B_j u_{j+1} = F_j, \quad j = 1, \dots, N-1. \quad (5)$$

Вид операторов  $B_j$  позволяет решить уравнение для плотности независимо от других уравнений системы. Данное уравнение имеет следующий блочно-трехдиагональный вид

$$A_j (\xi_\rho^{n+1})_{j-1} + C_j (\xi_\rho^{n+1})_j + B_j (\xi_\rho^{n+1})_{j+1} = F_j. \quad (6)$$

Здесь матрицы

$$A_j = - \frac{\alpha \cdot \tau (|v_2| + v_2)_{ij-1}}{h_2} \cdot I,$$

$I$  – единичная матрица,

$$B_j = \frac{\alpha \cdot \tau (|v_2| - v_2)_{ij+1}}{h_2} \cdot I,$$

$$C_j = \begin{pmatrix} C_{j1,12} & C_{j1,11} & \cdot & 0 \\ C_{j2,1} & C_{j2,12} & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & C_{jM-1,1} & C_{jM-1,12} \end{pmatrix},$$

$$C_{jk,12} = 1 + \frac{\alpha \cdot \tau}{h_1} (v_1)_{kj} + \frac{\alpha \cdot \tau}{h_2} (v_2)_{kj},$$

$$C_{j1,11} = - \frac{\alpha \cdot \tau (|v_1| + v_1)_{1j}}{h_1^2},$$

$$C_{jm,1} = \frac{\alpha \cdot \tau (|v_1| - v_1)_{mj}}{h_1^2},$$

$$i = 1, \dots, M-1;$$

$$j = 1, \dots, N-1;$$

$$k = 1, \dots, M-1;$$

$$m = 2, \dots, M-1$$

и

$$\begin{aligned}
 (\xi_\rho^{n+1})_j &= ((\xi_\rho^{n+1})_{1,j}, (\xi_\rho^{n+1})_{2,j}, \dots, (\xi_\rho^{n+1})_{M-1,j}) = \\
 &= ((\frac{\rho^{n+1} - \rho^n}{\tau})_{1,j}, \dots, (\frac{\rho^{n+1} - \rho^n}{\tau})_{M-1,j}).
 \end{aligned}$$

Коэффициенты уравнения (6) являются квадратными матрицами размерности  $M-1$ . Тогда при решении системы (6) матричной прогонкой вычислительной системе потребуются следующие ресурсы [2]:

- Объем памяти порядка  $O(M^2 \cdot (N + 1))$  байт для хранения прогоночных коэффициентов и обратной матрицы.
- Процессор с быстродействием порядка  $O(M^3 N + M^2 N)$  арифметических операций.

### III. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ

Для численного решения системы (6) на вычислительной системе воспользуемся методом параллельной матричной прогонки.

После преобразования координат физическая область отображается в расчетную математическую (прямоугольник) (рис.1) с равномерной сеткой из  $M \times N$  узлов.

Для решения на многоядерной вычислительной системе (рис.2) используем метод декомпозиции расчетной области. Представим расчетную область в виде объединения прямоугольных подобластей размерности  $M \times [N/p]$ . Здесь  $p$  - число вычислительных устройств.

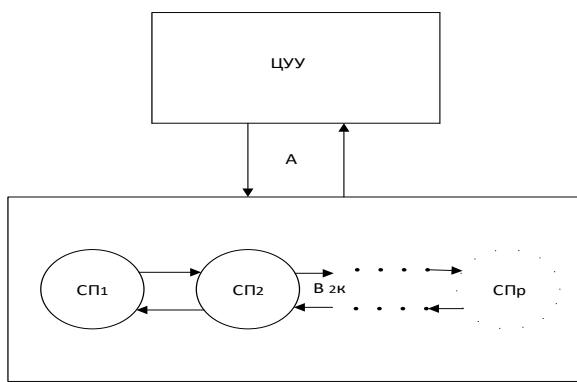


Рис. 2. Модель параллельного компьютера

Данный способ приводит к разбиению системы (6) на вычислительные блоки такой же размерности.

Существуют различные подходы к построению алгоритмов параллельной матричной прогонки [3, 4]. Предлагается алгоритм, в котором граничные неизвестные считаются параметрами системы одного блока - обобщающий алгоритм скалярной параллельной прогонки, рассмотренный в работе [5].

*Первый этап.* После выбора индексов граничных неизвестных по формуле  $I_j = [jN/p]$ ,  $j \in [0, p]$  решается серия, состоящая из  $2M+1$ -й вспомогательной задачи с общей блочно-трехдиагональной матрицей и разными правыми частями.

Количество арифметических операций [2] составит

$$O(M^3 \left[ \frac{N}{p} - 2 \right] + (12M + 6)M^2 \left[ \frac{N}{p} - 2 \right]).$$

*Второй этап.* Решается блочно-трехдиагональная редуцированная система для нахождения граничных неизвестных с индексами  $I_j$ , коэффициенты которой зависят от решения вспомогательных систем. Так как размерность системы совпадает с числом процессоров, система решается одним вычислительным устройством методом правой прогонки.

Количество арифметических операций составит

$$O(M^3 p + M^2 p)$$

без учета затрат на вычисление коэффициентов системы.

*Третий этап.* Восстанавливается исходное решение системы (6) для ненайденных переменных вычислительного [4]. Для нахождения произведения матриц, решений вспомогательных задач число арифметических операций составит

$$O(2M^3 \left[ \frac{N}{p} - 2 \right] - M^2 \left[ \frac{N}{p} - 2 \right]),$$

а общее число арифметических операций

$$O(4M^3 - 2M^2 + 1) \left[ \frac{N}{p} - 2 \right].$$

Анализ этапов позволяет оценить вычислительную эффективность параллельного алгоритма. С ростом размерности матриц системы (6) коэффициент ускорения (по числу арифметических операций) составит

$$k_y = \frac{N}{17(\left[ \frac{N}{p} - 2 \right] + p)}.$$

Максимальное значение коэффициент ускорения достигается при  $p \approx \sqrt{N}$ .

Альтернативной численной моделью является использование для уравнения (4) алгоритмов расщепления с последующей факторизацией стабилизирующего оператора схемы. После расщепления операторов  $B_j$  по физическим процессам схему (4) можно записать в каноническом виде:

$$\left( I + \tau\alpha \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^2 B_{jh}^l \right) \frac{f^{n+1} - f^n}{\tau} = - \sum_{j=1}^2 B_{jh} (\alpha f^n + \beta f^{n-1}) + F_h^n = - A^{-1} J \bar{W}_h^n. \quad (7)$$

Тогда с точностью до второго порядка по времени схема (7) эквивалентна следующей схеме в дробных шагах:

$$\begin{aligned} \xi^n &= -A^{-1} J \bar{W}_h^n, \\ (I + \tau\alpha B_{1h}^1) \xi^{n+\frac{1}{4}} &= \xi^n, \\ (I + \tau\alpha B_{1h}^1) \xi^{n+\frac{2}{4}} &= \xi^{n+\frac{1}{4}}, \\ (I + \tau\alpha B_{1h}^1) \xi^{n+\frac{3}{4}} &= \xi^{n+\frac{2}{4}}, \\ (I + \tau\alpha B_{1h}^1) \xi^{n+1} &= \xi^{n+\frac{3}{4}}, \\ f^{n+1} &= f^n + \tau \xi^{n+1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Параллельный алгоритм для системы (8) строится с использованием скалярной параллельной прогонки реализующейся на дробных шагах схемы [6].

### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Тестовый расчет двумерного обтекания сверхкритического крылового профиля выполнен на основе осредненных по Фавру уравнений Навье – Стокса в программном пакете ANSYS FLOTTRAN CFD.

В табл. 1 приведены рассчитанные значения характеристик потока.

ТАБЛИЦА 1. Характеристики потока

Характеристика	<i>Горизонталь- ный полет<sup>a</sup></i>	<i>Взлет</i>	<i>Посадка</i>	<i>После посадки</i>
Скорость (м/с)	220	75	56	20
Угол набегания потока (Град)	0	30	30	0
Давление (кПа)	54	101	101	101
Температура (К)	255	293	293	293

На рис. 3 и 4 представлены результаты численного моделирования для сверхкритического профиля во время горизонтального полета. Можно увидеть, что в этом случае обтекание плавное, без вихрей, пограничный слой прилегает к контуру профиля. На контурном графике можно увидеть разность давлений над и под крылом – образуется подъемная сила.

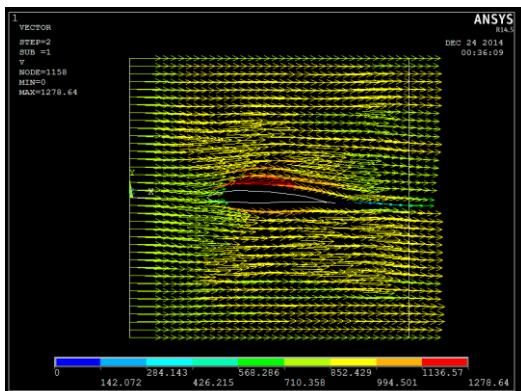


Рис. 3. Векторный график распределения скоростей

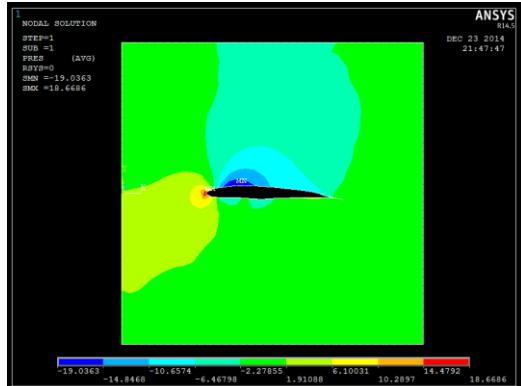


Рис. 4. Контуры давления

Рассмотрим более интересный случай - набор высоты.

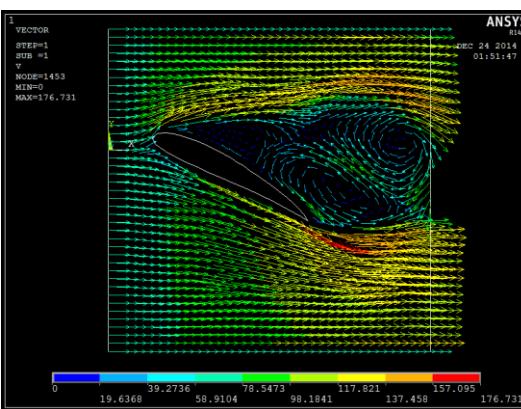


Рис. 5. Набор высоты (векторный график скоростей)

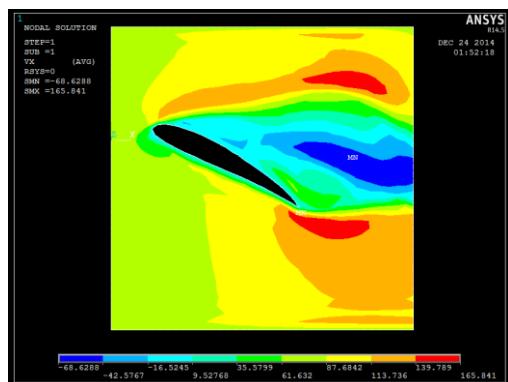


Рис. 6. Набор высоты (контуры скоростей)

Как можно видеть на рис. 5 и 6, при наборе высоты обтекание не является плавным, имеется место образование вихрей, которые говорят об отрыве пограничного слоя, что в свою очередь приводит к увеличению динамического сопротивления и уменьшению подъемной силы.

Рассмотрим влияние средств механизации на течение сжимаемого газа.

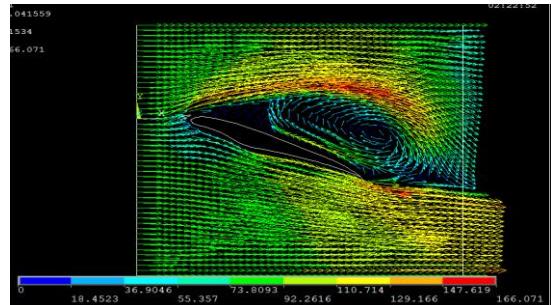


Рис. 7. Обтекание профиля крыла с выпущенным предкрыльком (векторный график скоростей)

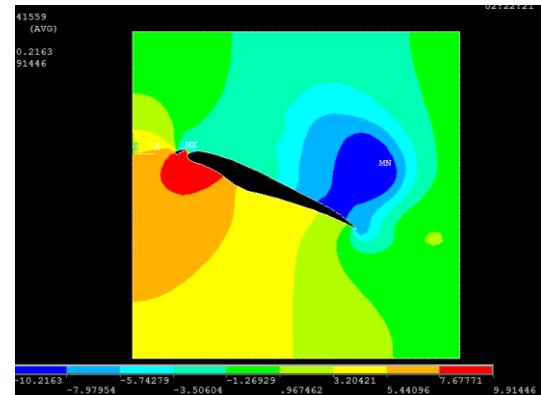


Рис. 8. Обтекание профиля крыла с выпущенным предкрыльком (контуры давления)

Для крыла с выпущенным предкрыльком обтекание также не является плавным, но количество образованных вихрей сократилось по сравнению с крылом без предкрылька. Падение давления в верхней задней части профиля создает пикирующий момент, который может компенсироваться с помощью стабилизаторов. Выпуск предкрыльков увеличивает критический угол атаки, коэффициент подъемной силы и уменьшает скорость сваливания самолета на 20–25 км/ч.

## V. Выводы

Область применения результатов настоящей работы – вычислительная аэрогидро- и газодинамика. Предложенные в работе параллельные алгоритмы позволяют повысить эффективность решения задачи обтекания крылового профиля. Результаты численного моделирования двумерного обтекания сверхкритического крылового профиля, проведенные с помощью прикладного пакета ANSYS, позволяют судить об основных значениях характеристик потока на основных этапах полета.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ковеня В.М. Алгоритмы расщепления при решении многомерных задач аэрогидродинамики. – Новосибирск. Изд-во СО РАН.2014. –280 с.
2. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1978. – 590 с.
3. Згировский А.А., Лиходед Н.А. Модифицированный метод параллельной матричной прогонки // Известия Национальной академии наук Белорусси. Серия физ.-мат. наук. – 2019. – Т. 55, № 4.
4. Акимова Е.Н., Белоусов Д.В. Параллельные алгоритмы решения СЛАУ с блочно-трехдиагональными матрицами на многопроцессорных вычислителях // Труды междунар. научной конференции "Параллельные вычислительные технологии'2011". – Челябинск: ЮУрГУ, 2011. – С. 27-36.
5. Гамолина И.Э., Семенистый В.В. Параллельная организация вычислений при расчете задач аэрогидродинамики прямыми методами // Международное научное сотрудничество, образование и культура. – Ростов-на-Дону: Summa-Rerum, 2014. – № 3 (4).
6. Семенистый В.В., Гамолина И.Э., Дурягина В.В. Параллельные методы решения прикладных задач: учебно-методическое пособие. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. - 49 с.

# Вычислительная реализация методов применения дробных операторов при обработке изображений

Жуков Анзор Людинович

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[anzorzhukov@gmail.com](mailto:anzorzhukov@gmail.com)

Бутенков Сергей Андреевич

Отдел цифровой обработки сигналов  
ООО “Научно-исследовательский  
центр Супер-ЭВМ и  
нейрокомпьютеров”  
Таганрог, Россия  
[saabmount@gmail.com](mailto:saabmount@gmail.com)

Нагоров Аслан Львович

кафедра прикладной математики и  
информатики Института  
Искусственного интеллекта и  
цифровых технологий  
Кабардино-Балкарский гос.  
Университет им. Х.М. Бербекова  
Нальчик, Россия  
[cuba13@rambler.ru](mailto:cuba13@rambler.ru)

**Аннотация.** В работе рассматривается применение дробных дифференциальных операторов в задачах обработки графических данных на плоскости (изображений). Используется математический аппарат свертки, ядро которой, в отличие от классического подхода, определяется дробным оператором с заданными параметрами. Это позволяет в широких пределах модифицировать функцию свертки, не изменяя алгоритма вычислений. Введена универсальная квадратурная формула для поставленной задачи, применение которой позволяет вычислять численное решение задачи свертки для широкого класса функций изображения. Получена эффективная техническая реализация этих результатов на базе ПЛИС.

**Abstract.** The presented paper deals with the fractional calculus operators, used for the image processing problems solving. The fractional kernels was used for the convolution algorithms in digital image processing. A fractional kernel provided with the processing parameters. As a result we obtain the adjustable image processing kernels. A common quadrature formula for the digital convolution processing was obtained and implemented by the special software for the high-performance computer design by the FPGA basis.

**Ключевые слова:** обработка изображений, дробный оператор, ядро свертки, обратная задача, квадратурная формула, высокопроизводительные вычисления, ПЛИС.

**Keywords:** image processing, fractional operator, convolution kernel, inverse problem, quadrature formula, high-performance computer, FPGA.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Исходная информация, используемая при формализации описаний объектов распознавания и классификации, обычно представляется в одной из двух форм: как результаты наблюдений, измерений, осмотра, экспертной оценки и т. п. или как изображения. В первом случае можно говорить об одномерных сигналах и использовании для их представления модели стандартной обучающей информации в смысле алгебраической теории распознавания, во втором – о многомерных сигналах, в частности о двух- и трехмерных изображениях, и использовании для их представления цифровых матриц [1].

Изображения обладают информационной емкостью, компактностью и наглядностью, а зрение является наиболее естественным для человека механизмом воспри-

ятия информации о внешнем мире и из внешнего мира. Изображения обычно несут большой объем информации, являющейся в ряде смыслов избыточной. Во-первых, они обладают статистической избыточностью, заключающейся в том, что элементы изображения, расположенные близко друг к другу, имеют близкие значения яркости [2].

При работе с изображениями возникают четыре основные проблемы: получение формализованных описаний (моделирование) изображений; разработка и выбор математических средств обработки, анализа и распознавания изображений; программная, архитектурная и аппаратная реализация математических методов работы с изображениями; оценка качества изображений [3].

Основным аппаратом цифровой обработки изображений является применение методов свертки с некоторой функцией ядра, выполняемое либо непосредственно над элементами изображения, либо над его дискретным преобразованием Фурье (ДПФ) [2]. При выполнении ДПФ выполняется естественное сжатие исходных изображений [1], однако для дальнейшего использования обработанных данных требуется выполнение обратного ДПФ, что приводит к увеличению времени обработки и к аппаратным затратам. В наших работах предложен подход к представлению изображений [4] и операций над ними [5] методом грануляции [1]. При этом обеспечивается как естественное сжатие изображений, так и их применение без последующих операций обратного преобразования.

## II. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Основными целями работы являются разработка математического и алгоритмического аппарата для построения эффективных систем обработки изображений, основанных на принципах фрактальной фильтрации и его реализация в распределенных вычислительных системах на основе ПЛИС.

Для достижения этих целей решается ряд задач.

- Получение явной формы общие уравнения свертки в виде дробных операторов.

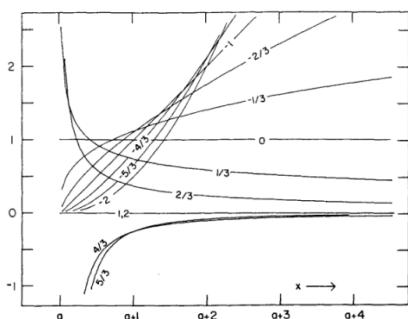
- Разработка универсальную формулу вычисления дробных операторов различного типа.
- Применение имеющихся высокоровневых средств проектирования структур ПЛИС для получения эффективной реализации разработанных расчетных формул в виде типовых блоков на ПЛИС.

Поставленные цели достигаются применением математического и алгоритмического аппарата теории пространственной грануляции многомерных данных [1]. Его применение позволяет моделировать вычислительную структуру расчетных формул с целью выбора оптимального варианта построения вычислительной схемы на ПЛИС.

Работа организована следующим образом. В разделе III излагаются теоретические основы применения дробных операторов для обработки данных. В разделе IV формулируется обратная задача для дробных операторов. В разделе V вводятся квадратурные формулы для дробных операторов. В разделе VI описывается реализация и исследование ее результатов для систем на ПЛИС. Раздел VII содержит выводы.

### III. ПРИМЕНЕНИЕ ДРОБНЫХ ОПЕРАТОРОВ В ОБРАБОТКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Изображение на картинной плоскости представляет собой множество перекрывающихся окрестностей точек (пикселов) [3]. Обработка изображений заключается в преобразовании значений в точках по некоторой функции от окрестности этой точки [2], т.е. в нахождении свертки по окрестности точки с некоторым ядром. Ядро свертки может быть дифференцирующим, интегрирующим или смешанным, что зависит от знака элементов ядра свертки [3]. Чаще всего используются комбинированные ядра, для конструирования которых используются самые различные подходы [1]. При этом весьма сложной задачей конструирования ядра свертки является нормирование ядра свертки. При искусственном задании ядер далеко не всегда удается корректно их нормировать, что искажает исходные параметры изображения [2]. Следующий рисунок демонстрирует пример выбора формы ядра путем задания параметра дробного оператора по [6].



Для (7) дробный оператор (6) интерпретируется как интеграл от функции с весом:

$$\int_a^x p(t) f(t) dt, \quad (8)$$

где правые и левые значения на единичном отрезке определяются весовой функцией  $p(t) = (x-t)^{\alpha-1}$ .

Квадратурная формула для (8) получается путем замены подынтегральной функции интерполяционным полиномом заданной степени. Она применима при произвольном выборе шага вычислений и реализуется на параллельных вычислительных системах [5]. В работе [9] был введен ряд частных квадратурных формул в гранулированной форме, пригодных для реализации на ПЛИС. Их вид изменяется в зависимости от выбранного порядка метода интегрирования и метода вычисления. В настоящей работе мы введем универсальные кубатурные формулы на моделях гранул. Также по ним можно вычислять как правосторонние (4) так и левосторонние (5) дробные операторы [6].

Для получения универсальности в выборе узлов интерполяционной квадратурной формулы введем общие обозначения для узловых коэффициентов  $U_i$ , определяющих расположение узлов  $i=1, \dots, N\omega$ . Для обеспечения универсальности в выборе метода введем весовые коэффициенты  $C_i$ , соответствующие выбранным узлам сетки  $\omega$  [10]. Для получения глобальной квадратурной формулы введем индекс локальных интервалов  $j=1, \dots, Nx$ . На локальных интервалах  $[{}^j x, {}^{j+1} x]$  используем интерполяционные формулы с узлами, задаваемыми массивом  $U_i$ , и с весами узлов на локальном интервале  $C_i$ . В этих обозначениях универсальная глобальная квадратурная формула имеет вид:

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{j=0}^{Nx-1} \sum_{i=0}^{N\omega-1} C_i \begin{vmatrix} {}^j x & 0 & \frac{1}{C_{met}} \\ {}^{j+1} x & 0 & \frac{1}{C_{met}} \\ {}^{j+1} x & f\left(\frac{{}^{j+1} x + {}^j x}{2} + \frac{{}^{j+1} x - {}^j x}{2} U_i\right) & \frac{1}{C_{met}} \end{vmatrix} + R(x). \quad (9)$$

где  $C_{met} = \sum_{k=0}^{N\omega-1} C_k$  – нормирующий коэффициент заданного метода интегрирования. Модели в гранулированном представлении (9) определяют типовую структуру многомерных кубатурных формул и позволяют строить реализации различных вариантов вычисления меры, а также (на основании свойств определителя) изменять таковую структуру при необходимости [10].

Для вычисления (4) на сетке значений  ${}^k x, k=1, \dots, N$ ,  $a \leq {}^k x \leq b$ , где сетка не обязательно может быть равномерной [5], из универсальной формулы (9) получим глобальную формулу для оператора (4) в виде:

$$y({}^k x_k) = \int_a^x \frac{f(x)}{({}^k x - t)^{1-\alpha}} dx = \begin{vmatrix} {}^k x & 0 & \frac{1}{C_{met}} \\ {}^j t & 0 & \frac{1}{C_{met}} \\ {}^{j+1} t & f\left(\frac{{}^{j+1} t + {}^j t}{2} + \frac{{}^{j+1} t - {}^j t}{2} U_i\right) & \frac{1}{C_{met}} \end{vmatrix} + R(x). \quad (10)$$

Аналогичную по структуре универсальную формулу на той же сетке можно получить для оператора (5) в виде:

$$y({}^k x_k) = \int_x^b \frac{f(x)}{({}^k x - t)^{1-\alpha}} dx = \begin{vmatrix} {}^k x & 0 & \frac{1}{C_{met}} \\ {}^j t & 0 & \frac{1}{C_{met}} \\ {}^{j+1} t & f\left(\frac{{}^{j+1} t + {}^j t}{2} + \frac{{}^{j+1} t - {}^j t}{2} U_i\right) & \frac{1}{C_{met}} \end{vmatrix} + R(x). \quad (11)$$

Здесь изменяется только разбивка сетки  $\omega$  по координате, при этом алгоритм вычислительной части остается неизменным, что крайне важно при аппаратной реализации формул (10) и (11) на ПЛИС [10].

Полученные универсальные формулы (10) и (11) позволяют приближенно решать задачу инверсии Абеля с помощью дробных операторов [6]. Их основной особенностью является возможность модификации структуры вычислений применительно к требованиям организации используемой вычислительной системы. Эти формулы эффективно реализуются в высокопроизводительных вычислительных системах на ПЛИС [11].

## VI. РЕАЛИЗАЦИЯ КВАДРАТУРНЫХ ФОРМУЛ

Общая структура РВС на ПЛИС строится с помощью метода параллельно-конвейерного представления информационных графов. Для сборки структур РВС из типовых макросов могут использоваться разработанные в НИЦ СЭ и НК высокоуровневые средства проектирования: алгоритмический язык COLAMO и язык уровня ассемблера Fire Constructor [12].

В рамках нашего подхода аппаратная реализация универсальных квадратурных формул на вычислительных системах ПЛИС сводится к построению структур, составленным из типовых базовых элементов [11]. Следовательно, для повышения вычислительной эффективности систем выполнения численных расчетов следует ускорять вычисление базовых элементов [5].

Для вычисления определителей используются методы гауссовского исключения или иного треугольного разложения. Они имеют вычислительную сложность порядка  $O(kn^2)$  для задач в  $R^n$ . Наша методология позволяет ввести алгоритмы вычисления определителей

наших моделей (имеющих специальный вид [5]) с вычислительной сложностью порядка  $O(kn)$ , что позволяет значительно снизить время вычислений при росте размерности задачи [12].

Нами предложен простейший алгоритм вычисления определителей моделей (10) и (11), инвариантный как к аффинным преобразованиям координат, так и к некоторым нелинейным преобразованиям, применяющимся в задачах математической физики [13]. Оба алгоритма имеют линейную вычислительную сложность (см. рис. 1) и могут использоваться в кластерных высокопроизводительных вычислительных системах [14].

Следующий рисунок показывает сравнительное изменение времени вычисления определителей базовых элементов по различным алгоритмам при повышении размерности пространства данных от 1 до 5.

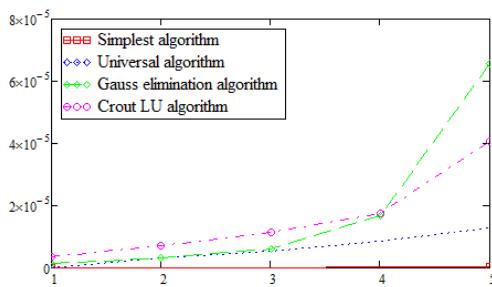


Рис. 2. Изменение времени (в ms) вычисления базового элемента при росте размерности для различных алгоритмов на процессоре i5-4670 3.40 ГГц

Для реализации полученных универсальных формул типа (10) и (11) использован алгоритмический язык высокого уровня COLAMO, позволяющий кодировать алгоритмы обработки данных в вычислительные структуры для ПЛИС [12]. При проектировании на COLAMO реальных задач серьезной проблемой является учет ограниченности ресурсов ПЛИС. В разработанной программе был использован метод редукции по ресурсам [12], что позволило найти вариант пирамидального вычисления по формулам в параллельно-конвейерной форме. Это позволило сократить количество используемых контроллеров распределенной памяти [12].

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методология обработки изображений с использованием дробных операторов обобщает известные подходы к обработке изображений методами сверток [2] и позволяет получить существенно упрощенную структуру системы обработки (за счет реализации универсальной формулы вычисления свертки на основе (10),

(11)). Новая квадратурная формула универсальна по отношению к выбору шага вычислений и легко реализуема на параллельных высокопроизводительных вычислительных структурах [14].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Butenkov S., Krivsha V., Krivsha N. Recognition and Perception of Images. Fundamentals and Applications // Chap. 7. The use of Mathematical Apparatus of Spatial Granulation In: The Problems of Perception and Image Recognition.– 2021, John Wiley & Sons, Inc., 111, River Street, Hoboken, NJ07030, USA. – P. 220-257.
2. Бейтс Р., Мак-Доннел М. Восстановление и реконструкция изображений: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 336 с., ил.
3. Topological algorithms for Digital Image Processing / Kong T.Y., Rosenfeld A. (editors) North-Holland, Elsevier Science, Amsterdam, 1996.
4. Butenkov S., Zhukov A., Nagorov A., Krivsha N. Granular Computing Models and Methods Based on the Spatial Granulation // XII Int. Symposium «Intelligent Systems», INTELS'16, 5-7 October 2016, Moscow, Russia. Elsevier Procedia Computer Science. – 2017. – 103. – P. 295-302.
5. Бутенков С.А., Нагоров А.Л. Моделирование структур вычисления кубатурных формул // Вторая Всероссийская конференция «Актуальные проблемы математики и информационных технологий», Махачкала, 3–5 февраля 2021 г. – Махачкала: Изд. ДГУ, 2021. – С. 54-58.
6. Наушев А.М. Дробное исчисление и его применение. – М.: Физматлит, 2003. – 272 с.
7. Нагоров А.Л. Методы математического моделирования процессов на гранулированных моделях физических сред // В сб. трудов Международной научной конференции «Информационно-вычислительные технологии и математическое моделирование» ИВТ&ММ, Кемерово, 23–30 июня 2013 г. – С. 134-137.
8. Бутенков С.А. Об одной модели для выделения наклонных краев изображений // Известия ТРТУ. – 1998. – № 2. – С. 112-117.
9. Нагоров А.Л. Численные методы для дробных операторов в системах обработки изображений // Фундаментальные и прикладные проблемы математики и информатики: Материалы конф.– Махачкала, 2017. – С. 138-140.
10. Бутенков С.А., Кривша В.В., Кривша Н.С. Моделирование структуры кубатурных формул для проектирования эффективных вычислительных структур на ПЛИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 5 (215). – С. 75- 85.
11. Бутенков С.А., Кривша В.В., Савченко А.В. Типовые блоки вычисления квадратурных формул на языке COLAMO для ПЛИС // Суперкомпьютерные технологии: Сборник трудов молодых ученых; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – С. 116-120.
12. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры. – Ростов-на-Дону: Изд.-во ЮНЦ РАН, 2009. – 344 с.
13. Бутенков С.А., Жуков А.Л. Оптимизация базовых структур вычисления кубатурных формул // Материалы III Всероссийской конференции (г. Махачкала, 7-9 февраля 2021 г.). – Махачкала: Издательство ДГУ, 2022. – С. 65-68.
14. Бутенков С.А. Программный комплекс гранулированного моделирования для многомерных данных // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012618586, 21.09.2012 г.

# Статистический анализ данных о грозовой активности на Северном Кавказе

Аджиев Анатолий Хабасович

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»  
Нальчик, Россия  
*adessa1@yandex.ru*

Керевова Залина Музариновна

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»  
Нальчик, Россия  
*zknuyaz-kbsu@mail.ru*

**Аннотация.** В настоящей работе приводятся результаты выполненного статистического анализа данных о грозовой активности на Северном Кавказе. Для анализа были использованы данные по инструментальным и визуально-слуховым наблюдениям с 2009 по 2012 гг. Сравнения средних значений числа дней с грозой в году показывают, что данные инструментальных наблюдений превышают аналогичные данные метеостанций. Также была установлена взаимосвязь числа дней с грозой и площади территории.

**Abstract.** In this paper, we use the results of a statistical analysis of data on thunderstorm activity in the North Caucasus. For the analysis, data on instrumental and effect observations from 2009 to 2012 were used. Comparison of the average number of days with a formidable load in a year that the data of instrumental data reveals the data of weather stations. The relationship between the number of days with thunderstorms and the area of the territory was also established.

**Ключевые слова:** грозы, молнии, инструментальный метод, визуально-слуховой, статистический анализ, число дней с грозой.

**Keywords:** thunderstorms, lightning, instrumental method, visual-auditory, statistical analysis, number of days with thunderstorms.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Грозы представляют собой опасные природные явления, наносящие ущерб многим отраслям человеческой деятельности. Причинами пожаров, повреждением линий электропередач и др. также являются молнии. Поэтому актуальным является исследование и последующий прогноз гроз и способов защиты от молний.

Для исследования и сравнительного анализа данных, полученных визуально-слуховым и инструментальными методами наблюдений за грозами на определенной территории, было высчитано число грозовых дней. Анализ проводился по данным, полученным с 2009 по 2012 гг. на территориях Ростовской области и Краснодарского края по данным грозорегистратора LS8000 и на основе визуально-слуховых наблюдений (табл. 1).

Система грозопеленгации установлена впервые в России на Северном Кавказе в 2008 году [1]. Она является высокоточной аппаратурой для регистрации грозовых разрядов и их параметров.



Рис. 1. Внешний вид датчика грозорегистратора на точке «Кызбурун»

Система состоит из четырех грозопеленгаторов LS8000 фирмы Vaisala и центрального пункта приема и обработки информации от датчиков. Грозопеленгаторы расположены вблизи населенных пунктов: Черкесск (КЧР), Кызбурун (КБР), Ставрополь и Зеленокумск (Ставропольский край).

В 2019 году было установлено ещё два грозопеленгатора LS7002, более совершенные модели той же компании – Vaisala (Финляндия). Грозопеленгаторы LS7002 установлены в населенных пунктах Кореновск и Туапсе (Краснодарский край).

Благодаря такому размещению достигнута высокая эффективность работы системы.

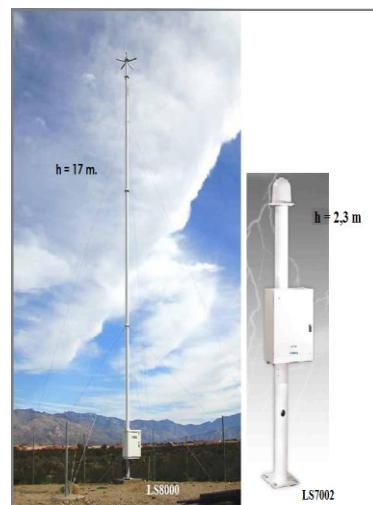


Рис. 2. Грозопеленгаторы LS8000 и LS7002

Центральный пункт приема и обработки информации – это аппаратно-программный комплекс, состоящий из 6 компьютеров, программного обеспечения фирмы Vaisala и оборудования для спутниковой связи с грозопеленгаторами LS8000.

В процессе работы комплекс регистрирует:

Дату и время с точностью 100 наносекунд.

Широту, долготу (WGS-84).

Силу и полярность сигнала (тока в канале разряда), в кА.

Количество датчиков, использованных при определении местоположения разряда молнии.

Большую полуось эллипса 50% вероятности.

Малую полуось эллипса 50% вероятности.

Классификацию разрядов на типы облако-земля или внутриоблачный разряд.

Классификацию разрядов на положительные и отрицательные.

Позиционную уверенность (chi-квадрат).

Время роста сигнала до пикового значения, в мкс.

Время спада сигнала от пикового значения до нуля, в мкс.

Максимальное значение скорости увеличения сигнала ( крутизна тока молнии), в кА/мкс.

Грозорегистратор LS 8000 позволяет регистрировать значения токов молний с делением их на положительные и отрицательные.

ТАБЛИЦА 1. Количество грозовых дней в Ростовской области и по Краснодарскому краю по данным метеостанций и по данным грозорегистратора LS8000 за период 2009-2012 гг.

Годы		Всего метеост. Рост.обл.	Всего по данным LS8000 Рост.обл.	Всего по метеостанц. Кр.края	Всего по данным LS8000 по Кр.краю
Количество дней с грозой	2009	79	89	140	158
	2010	86	72	131	136
	2011	84	80	126	133
	2012	100	160	133	138

Как видно из таблицы, инструментальный метод регистрации гроз дает большее количество грозовых дней, что можно объяснить тем, что в визуально-слуховом методе человеческий фактор не дает распознать некоторую часть молний.

В предлагаемой работе мы рассматривали временные особенности и регрессионную зависимость гроз в различных районах и в разные годы. Выбранные территории характеризуют в полной мере погодные явления юга европейской части России. В работе выполнен статистический анализ с использованием данных метеостанций и инструментальных данных.

В метеорологии широко применяются статистические методы анализа больших массивов наблюдений. Применение мощных современных статистических методов помогает яснее представить факты и лучше обнаружить связь между ними [2–6].

Статистический анализ полученных данных включал [7–8]:

- Определение средних значений грозовой активности.

Среднее значение временного ряда рассчитывалось по формуле

$$\bar{G} = \sum G_i / N, \quad (1)$$

где  $1 < i \leq N$ ,  $N$  - число данных (объем выборки).

- Расчет дисперсии временного ряда грозовых характеристик.

Дисперсия показывает разброс данных относительно среднего значения и находилась по формуле:

$$\sigma^2 = \sum (G_i - \bar{G})^2 / N, \quad (2)$$

где  $1 < i \leq N$

- Определение среднеквадратичных отклонений по временными рядам.

Величина, называемая среднеквадратическим отклонением, представляет собой квадратный корень из дисперсии.

$$\sigma = \sqrt{\sum (G_i - \bar{G})^2 / N}, \quad (3)$$

где  $1 < i \leq N$

- Определение моды временного ряда грозовой активности.

Все большее применение в метеорологии находит наиболее вероятное значение случайной переменной – мода.

- Выявление асимметрии временного ряда грозовой активности.

Также для характеристики метеовеличин используют асимметрию и эксцесс [9–13]. Если среднее значение больше моды, то распределение частот называют положительно асимметричным. Если среднее значение меньше моды, то отрицательно асимметричным. Коэффициент асимметрии вычисляется по формуле

$$A = \sum (G_i - \bar{G})^3 / N\sigma^3, \quad (4)$$

где  $1 < i \leq N$

Асимметрия считается малой, если коэффициент асимметрии  $|A| \leq 0.25$ . Асимметрия умеренная, если  $0.25 < |A| > 0.5$ . Асимметрия большая, если  $0.5 < |A| > 1.5$ . Исключительно большая асимметрия, если  $|A| > 1.5$ . Если  $|A| > 0$ , то распределение имеет правостороннюю асимметрию, если  $|A| < 0$ , то левостороннюю асимметрию.

Для распределения частот, имеющих одинаковые значения средней, асимметрии могут отличаться величиной эксцесса

$$E = \sum (G_i - \bar{G})^4 / N\sigma^4 - 3, \quad (5)$$

где  $1 < i \leq N$

Эксцесс считается малым, если  $|E| \leq 0.5$ ; умеренным, если  $1 \leq |E| \leq 3$  и большим, если  $|E| > 3$ . Если  $-0.5 \leq E \leq 3$ , то эксцесс приближается к нормальному.

Таким образом, используя указанные формулы и табл. 1, по данным полученным, инструментальным путем и визуально-слуховым методом на территории Краснодарского края за 4 года, был проведен статистический анализ. Определялись: среднее значение числа дней с грозой, среднеквадратичное отклонение, дисперсия, мода, асимметрия, эксцесс, минимальное и максимальные значения.

Площадь Краснодарского края была поделена на 19 участков и подсчитывали дни с грозой по каждому участку. Участки были поделены таким образом, чтобы в каждом находилась одна или две метеостанции. Были получены данные по данным метеостанций и по инструментальным наблюдениям по этим 19 площадям. Анализировались значения характеристик по 19 площадям, поэтому брали объем выборки равной 19, то есть определялись среднестатистические значения на отдельных территориях Краснодарского края (табл. 2 и 3).

ТАБЛИЦА 2. РАСЧЕТЫ ПО ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ ПО РАЗДЕЛЕННЫМ 19 ПЛОЩАДЯМ

Стат. хар-ки	2009	2010	2011	2012
Объем выборки, N	19	19	19	19
Средн. знач., $\bar{G}$	61	41	43	54
Дисперсия, $\sigma^2$	836	549	573	424
СКВО, б	29	23	24	21
Мода	30	31	52	34
Мин.	13	2	5	23
Макс.	122	86	84	86
Асимметрия, A	0,4	0,09	-0,04	0,3
Эксцесс, E	-0,7	2,2	1,9	1,9

Из таблицы видно, что средние значения числа дней с грозой в отдельные годы в переделах от 41 до 61. В среднем, за 4 года асимметрию можно считать малой, она равна 0,19. Средние значения превышают моду, откуда следует, что распределение частот положительно асимметрично. Эксцесс приближается к нормали.

Распределения расчетных характеристик инструментальных регистраций грозовой активности по территории Краснодарского края приведены на рис. 3. По осям отложены годы и значения для каждой статистической характеристики.

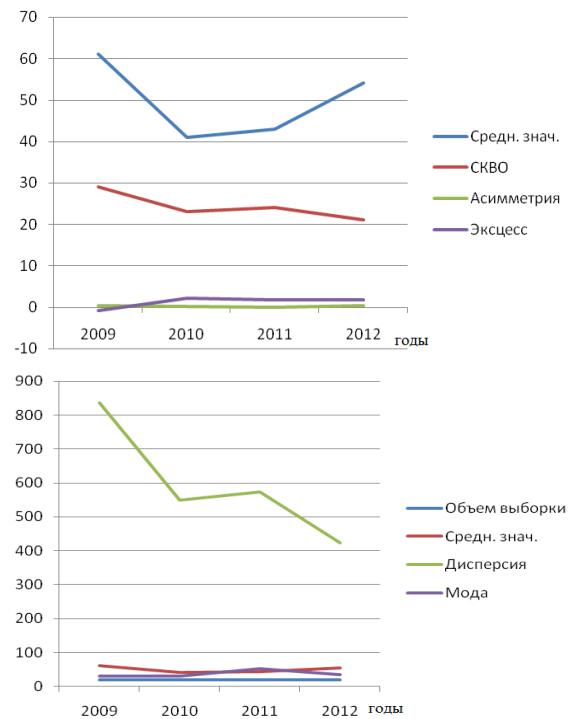


Рис. 3. Статистический анализ инструментальных данных на территории Краснодарского края по 19 площадям за 2009-2012 гг.

Аналогичные расчеты нами были выполнены и для данных 19 метеостанций с 2009 по 2012 гг. (табл. 3, рис. 4).

ТАБЛИЦА 3. РАСЧЕТЫ ПО ДАННЫМ МЕТЕОСТАНЦИЙ НА ТЕРРИТОРИИ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ ПО РАЗДЕЛЕННЫМ 19 ПЛОЩАДЯМ

Стат. хар-ки	2009	2010	2011	2012
Объем выборки, N	19	19	19	19
Средн. знач., $\bar{G}$	34	36	32	38
Дисперсия, $\sigma^2$	99,5	127	139	255
СКВО, б	9,9	11	12	16
Мода	26	30	33	37
Мин.	19	26	16	14
Макс.	56	70	66	77
Асимметрия, A	0,6	1,6	0,05	0,4
Эксцесс, E	-0,5	2,4	1,1	2,8

Из таблицы видно, что средние значения числа дней с грозой за четыре года составляет 35. Асимметрия оказалась исключительно большой в 2010 году. Средние значения незначительно превышают моду, то есть - распределение частот положительно асимметрично. Эксцесс и в данном случае приближается к нормали.

На рис. 4 приведены распределения статистических характеристик.

Согласно приведенным расчетам, среднее число дней с грозой по инструментальным данным по годам 2009, 2010, 2011 и 2012 составили 61, 41, 43 и 54 соответственно. Асимметрия анализируемых данных умеренная ( $-0,4 < A < 0,4$ ).

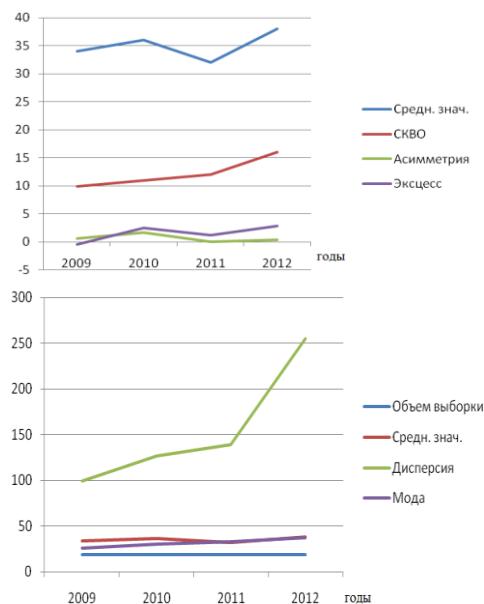


Рис. 4. Статистический анализ метеоданных Краснодарского края по 19 площадям за 2009–2012 гг.

Сравнения средних значений числа дней с грозой в году приведенных в табл. 2 и 3 показывают, что данные инструментальных наблюдений превышают аналогичные данные метеостанций. Так, средние значения инструментальных измерений числа грозовых дней в году по годам 2009, 2010, 2011 и 2012 превышают аналогичные данные метеостанций на 27, 5, 11 и 16 дней. При этом, среднеквадратичные отклонения (дисперсия) по инструментальным данным примерно в 2,5 раза больше, чем по данным метеостанций. Отмеченное показывает, что инструментальное определение климатических характеристик гроз значительно эффективнее, чем визуально-слуховой метод.

Аналогичные выводы можно сделать и на фиксации ложных гроз указанными методами. Так, согласно сделанным расчетам, среднее значение минимального числа грозовых дней по инструментальным данным составляет по указанным годам – 10,7 дней, а по визуально-слуховым данным – около 18,7 дней. Подобные расчеты нами были проведены и для отдельных метеостанций и территорий.

## II. Количество дней с грозой в зависимости от площади территории

Важной климатической характеристикой также является количество грозовых дней для конкретной территории. Пространственное распределение гроз необходимо учитывать при планировании различных видов хозяйственной деятельности.

Построение карт с отражением числа дней с грозой в году может быть использовано при разработке систем грозозащиты производственных объектов, линий электропередачи и связи, для оценки вероятности возникновения лесных пожаров от грозовых разрядов и повреждения сельскохозяйственных культур в результате выпадения града.

Для поиска взаимосвязи между числом дней с грозой в году и ограниченной площадью для определенной части территории Северного Кавказа, сделана следующая выборка данных.

Определялось среднее число дней с грозой по данным грозорегистратора LS 8000 и метеостанциям.

Всю территорию Краснодарского края по форме рельефа можно разделить на две неравные части: северную равнинную, занимающую приблизительно две трети всей территории, и южную горную, расположенную на одной трети Краснодарского края. Южная часть региона это: предгорная полоса, горная часть и Черноморское побережье.

Северная часть Краснодарского края занимает высоты между 0 и 300 м от берегов Азовского моря на северо-западе до предгорий Кавказского хребта на юге. Северная окраина Кавказских гор занимает территорию приблизительно в 30 тысяч км<sup>2</sup>. На севере и западе высоты до 500 метров; на юге и юго-востоке – до 800 метров от уровня моря. Почти всю территорию южной части Краснодарского края занимает горная часть, которая тянется в юго-восточном направлении на 340 км (в пределах региона). Поэтому независимо от площади территории, на которые разделены участки, видно, что большее количество дней с грозой приходится на южные участки.

В работе выполнялся поиск выражений, связывающие число дней с грозой Т с площадью S для территории Краснодарского края на основе визуально-слуховых наблюдений и грозопеленгационных регистраций.

Вывод формулы для данных, полученных с помощью грозорегистратора и метеостанций, требует выполнения регрессионного анализа. Регрессионный анализ проводился для среднегодового числа дней с грозой за 4 года и площадью территории.

Получена линейная формула регрессии для связи числа дней с грозой и площади территории в виде:

$$T_{\text{гр}} = 0,011 * S. \quad (6)$$

$$T_{\text{мет}} = 0,008 * S. \quad (7)$$

Выражение (6) связывает площадь территории с числом дней с грозой по данным грозорегистратора; выражение (7) – связь между числом дней с грозой, полученным при визуально-слуховых наблюдениях и площадью территории. То есть, найден вид зависимости Т от S.

Из выражений (6) и (7) следует:

$$T_{\text{гр}} = 1,375 T_{\text{мет}}. \quad (8)$$

Отсюда следует, что система LS8000 регистрирует большее число дней с грозой, чем метеостанции.

С учетом того, что день считался грозовым, если была зафиксирована, хотя бы одна гроза, были проанализированы данные по 31 метеостанции за 2009–2012 годы.

По полученным данным, выполнен регрессионный анализ, что помог определить аналитическое выражение связи зависимой случайной величины Т (результативный признак) с независимыми случайными величинами S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, ..., S<sub>m</sub> (факторами). То есть были смоделированы измеряемые данные и исследованы их параметры.

На рис. 5 приведена регрессионная модель – количество дней с грозой Т в зависимости от площади территории S.

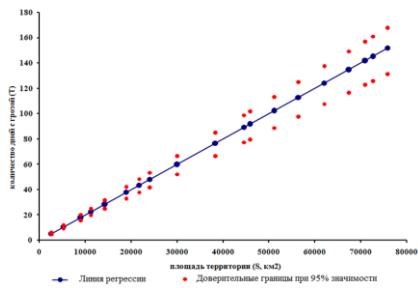


Рис. 5. Линия регрессии, связывающая количество дней с грозой  $T$  с площадью территории  $S$

Параметры модели настроены таким образом, что модель наилучшим образом приближена к данным. За критерий качества приближения брали среднеквадратическую ошибку.

Из рис. 5 видно, что с увеличением площади территории увеличивается соответственно и количество дней с грозой на данной площади.

Ошибка составила 29%. Из рисунка видно, что число дней с грозой в году линейно зависит от площади территории. Вид зависимости характеризуется наклоном линии регрессии равной  $T_{\text{мет}}/S=0,008$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аджиев А.Х., Аджиева А.А., Тумгоева Х.А. Мониторинг грозовых явлений на Северном Кавказе // Материалы второй международной конференции «Моделирование устойчивого регионального развития», Нальчик 14-18 мая 2007. – Т. 3. – Нальчик: Изд-во: КБНЦ РАН, 2007. – С. 6-8.
2. Соколов Г.А., Гладких И.М. Математическая статистика. Российская экономическая академия им. Г.В. Плеханова.
3. Мисюк Н.С., Мастыкин А.С., Кузнецов Г.П. Корреляционно-регрессионный анализ в клинической медицине. Академия медицинских наук. 1975.
4. Андронов А.М., Копытов Е.А., Гринглас Л.Я. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2004. – 461 с.
5. Нейман Ю. Вводный курс теории вероятностей и математической статистики. – М.: Наука, 1968.
6. Глинский В.В., Ионин В.Г. Статистический анализ. – М.: Филинъ, 1998.
7. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование // Статистические методы анализа данных. – 2012. – 624 с..
8. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики: учебник. – М.: ЮНИТИ, 1998.
9. Соколов Г.А., Гладких И.М. Математическая статистика. Российская экономическая академия им. Г.В. Плеханова.
10. Мисюк Н.С., Мастыкин А.С., Кузнецов Г.П. Корреляционно-регрессионный анализ в клинической медицине. Академия медицинских наук. 1975.
11. Андронов А.М., Копытов Е.А., Гринглас Л.Я. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2004. – 461 с.
12. Нейман Ю. Вводный курс теории вероятностей и математической статистики. – М.: Наука, 1968.
13. Глинский В.В., Ионин В.Г. Статистический анализ. – М.: Филинъ, 1998.
14. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование. Статистические методы анализа данных. – 2012. – 624 с..
15. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики: учебник. – М.: ЮНИТИ, 1998.

# Оптимизация разносторонних схем в задачах управления гиперболическими уравнениями

**Клово Александр Георгиевич**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет

Таганрог, Россия

*agklovo@sfedu.ru*

**Куповых Геннадий Владимирович**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет

Таганрог, Россия

*kupovskykh@sfedu.ru*

**Гончаров Анатолий Вячеславович**

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет

Таганрог, Россия

*anatg@sfedu.ru*

**Аннотация.** Рассмотрена возможность синтеза оптимального управления при приведении струны в состояние покоя под воздействием управления в граничных условиях. В случае однородной струны показана роль выбора минимизирующего функционала, обеспечивающего возможность синтеза оптимального управления и нахождении всюду оптимального управления в явном виде. Для неоднородной струны при использовании консервативных разностных схем найдены инварианты, позволяющие добиваться аналогичных результатов при применении численных методов.

**Abstract.** The possibility of synthesis of optimal control when bringing a string to a state of rest under the influence of control in boundary conditions is considered. In the case of a homogeneous string, the role of choosing a minimizing functional that provides the possibility of synthesizing optimal control and finding optimal control everywhere in an explicit form is shown. For an inhomogeneous string using conservative difference schemes, invariants are found that allow achieving similar results when using numerical methods.

**Ключевые слова:** теория управления, колебания, разностные консервативные схемы, синтез оптимального управления, краевая задача.

**Keywords:** control theory, oscillations, differential conservative schemes, synthesis of optimal control, boundary value problem.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Оптимальное управление в граничных условиях колебаниями струны рассматривалось в ряде работ. В работе [1] указаны условия, при которых изучаемые краевые задачи имеют классические и в соответствующих функциональных пространствах обобщенные решения. В книге [2] рассмотрены вопросы управляемости колебаниями однородной струны и их связь с единственностью оптимального управления. В статье [3] и в других работах этих авторов и их учеников в различных ситуациях и в разных функциональных пространствах оптимальное управление гиперболическими уравнениями было найдено в явном виде. В работах [4–7] найдены условия всюду оптимальности управления и указано такое управление для однородной струны. В этом случае для минимизации надо взять функционал, который является инвариантом при отсутствии управляемого воздействия.

В указанных статьях методика получения результатов связано с возможностью решения поставленных задач явными методами. Это происходит только в случае решения поставленных задач для однородной струны.

В данной работе рассмотрены некоторые вопросы оптимального управления для неоднородной струны. В этом случае применяются разностные схемы для численного решения поставленной задачи [8]. При этом находятся разностные инварианты, которые и используются в качестве минимизируемого разностного функционала.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим колебания неоднородной струны  $x \in [0; l]$ , закрепленной на левом конце и управляемой на правом. Мы приходим к задаче:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$u|_{t=0} = \varphi(x), \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{t=0} = \psi(x), \quad (3)$$

$$u|_{x=0} = 0, \quad (4)$$

$$u|_{x=l} = p(t), \quad (5)$$

В задаче (1)–(5) функция  $k(x)$  является характеристикой неоднородности струны  $x \in [0; l]$ ,  $\varphi(x)$  – начальное положение точек струны,  $\psi(x)$  – профиль их начальных скоростей,  $p(t)$  – функция управления на правом конце струны. При решении задачи естественными являются условия согласования

$$\varphi(0) = 0, \psi(0) = 0, \varphi(l) = p(0), \psi(l) = p'(0). \quad (6)$$

Это связано с тем, что в некоторых точках дополнительные условия заданы дважды. Например, в точке с координатами  $(0; 0)$  значение искомой функции задано и условием (2), и условием (4). А производной по временной переменной определяется одновременно условиями (3) и (4). Аналогичная ситуация на другом конце

струны. Здесь значение функции в точке с координатами  $(l; 0)$  значение искомой функции задано и условием (2), и условием (5). А производной по временной переменной  $d$  ‘пјq пjxrt определяется одновременно условиями (3) и (5).

При выполнении условий (6) и достаточной гладкости функций  $k(x)$ ,  $\varphi(x)$ ,  $\psi(x)$ ,  $p(t)$  задача (1)-(5) имеет классическое решение. Этот факт был впервые установлен в работе профессора О.А. Ладыженской [1]. Под классическим решением понимается функция  $u(t; x)$ , определяющая отклонение от положения равновесия точки струны в точке с координатой  $x$  в момент времени  $t$ .

Ставится задача оптимального управления колебаниями струны путем минимизации некоторого функционала в некоторый фиксированный момент времени  $t = \tau$ . В работе [2], [3] рассматривались различные минимизируемые функционалы, например,

$$J_1(p) = \int_0^l \left( (u(T, x)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right|_{t=\tau})^2 \right) dx, \quad (7)$$

Для функционала (7) в работах [4, 5] приведены примеры таким образом поставленных задач оптимального управления на двух временных промежутках. При этом один из временных промежутков содержится в другом и одновременно на общем промежутке оптимальные управление не совпадают.

В указанных выше наших работах показано, что всюду оптимальность управления обеспечивает тот минимизируемый функционал, который является инвариантом при отсутствии управляющего воздействия. Для задачи (1)-(5) таким может быть функционал

$$J(p) = \int_0^l \left( \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right|_{t=\tau})^2 + \left(k(x) \frac{\partial u}{\partial x}\right|_{t=\tau})^2 \right) dx, \quad (8)$$

пропорциональный энергии струны. При этом всюду оптимальность поставленной задачи доказана в случае однородной струны, т.е. когда величина  $k(x)$  является константой.

Следует указать, что технология доказательства является достаточно сложной. Поэтому на данном этапе мы не можем утверждать, что аналогичные построения оптимального управления гарантируют его всюду оптимальность. Тем не менее проведем аналогичные построения и расчеты для неоднородной струны.

### III. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОЖДЕСТВО

Умножим обе части уравнения (1) на величину  $\frac{\partial u}{\partial t}$  и проинтегрируем обе части полученного тождества по области  $D_{t_1 t_2} = [t_1; t_2] \times [0; l]$ . Для интеграла от левой части соотношения имеем.

$$\begin{aligned} \iint_{D_{t_1 t_2}} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \frac{\partial u}{\partial t} dt dx &= \frac{1}{2} \int_0^l \left( \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 dt \right) dx = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^l \left( \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=t_2} - \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=t_1} \right)^2 dx. \end{aligned}$$

При интегрировании правой части получим более сложные преобразования. Мы вначале проведем интегрирование по частям по пространственной переменной  $x$ , а затем в интегральном слагаемом проинтегрируем по частям по временной переменной  $t$ . Следовательно,

$$\begin{aligned} &\iint_{D_{t_1 t_2}} \frac{\partial}{\partial x} \left( k(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right) \cdot \frac{\partial u}{\partial t} dt dx \\ &= \int_{t_1}^{t_2} k(l) \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=l} \cdot \frac{dp}{dt} dt \\ &- \iint_{D_{t_1 t_2}} k(x) \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} dt dx \\ &= \int_{t_1}^{t_2} k(l) \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=l} \cdot \frac{dp}{dt} dt \\ &- \frac{1}{2} \int_0^l \left( \left( k(x) \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 \right) \Big|_{t=t_2} - \right. \\ &\quad \left. \left( k(x) \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 \right) \Big|_{t=t_1} \right) dx = \\ &= \int_{t_1}^{t_2} k(l) \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=l} \cdot \frac{dp}{dt} dt - \frac{1}{2} \int_0^l \left( \left( k(x) \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 \right) \Big|_{t=t_2} - \right. \\ &\quad \left. \left( k(x) \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 \right) \Big|_{t=t_1} \right) dx, \end{aligned}$$

что приводит нас к энергетическому тождеству

$$\begin{aligned} &\int_0^l \left( \left( \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left( k(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right) \Big|_{t=t_2} \right) dx \\ &= \int_0^l \left( \left( \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left( k(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right) \Big|_{t=t_1} \right) dx + \\ &+ 2 \int_{t_1}^{t_2} k(l) \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=l} \cdot \frac{dp}{dt} dt. \end{aligned} \quad (9)$$

Из тождества (9) следует, что при отсутствии управляющего воздействия, т.е. при условии  $\frac{dp}{dt} = 0$  величина (8) остается постоянной величиной, не зависящей от времени.

### IV. ОБОБЩЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ (1)-(5)

Если задача оптимального управления заключается в минимизации положительно определенного квадратичного функционала, то, очевидно, существует нижняя грань значений функционала при всех допустимых управлениях. Следовательно, существует последовательность управлений, соответствующие минимизируемые функционалы которых сходятся к этому инфинуму. Для того, чтобы гарантировать существование предельного оптимального управления, необходимо перейти к обобщенным решениям поставленной задачи.

Построение обобщенного решения задачи (1)-(5) мы не будем сводить к простому предельному переходу в некотором функциональном пространстве. Следуя идеям О.А. Ладыженской [1], построим достаточно сложную конструкцию определения обобщенного решения поставленной задачи.

Для этого введем множество  $C_1(D)$  функций, которые обладают непрерывными производными, входящими в (1). При этом для каждой такой функции существует число  $\delta > 0$  такое, что эта функция не равна 0 не более, чем на множестве  $D_\delta = [\delta, l - \delta] \times [0, T]$ . И под  $C_1(D)$  мы будем понимать замыкание этих функций в про-

странстве  $W_2^1(D)$ . Также под  $C_2(D)$  мы будем понимать замыкание в  $W_2^1(D)$  тех же функций с дополнительным условием равенства 0 при  $t = T$ .

Пусть  $v(t, x) = p(t) \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right)$  и  $w(t, x) = u(t, x) - v(t, x)$ , где  $u(t, x)$  является решением искомой задачи (1)-(5). Тогда  $w(t, x)$  является решением задачи

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -p''(t) \left(1 - \frac{x}{l}\right), \quad (10)$$

$$w|_{t=0} = \varphi(x) - \varphi(0) \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right), \quad (11)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}|_{t=0} = \psi(x) - \psi(1) \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right), \quad (12)$$

$$w|_{x=0} = w|_{x=l} = 0. \quad (13)$$

Под обобщенным решением задачи (10)-(13) мы будем понимать функцию  $w(t, x) \in \overset{\circ}{C}_1(D)$ , предельные значения которой при  $t \rightarrow 0$  равны  $\varphi(x) - \varphi(0) \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right)$  и для каждой  $\sigma(t, x) \in \overset{\circ}{C}_2(D)$  справедливо тождество

$$\iint_D \left( \frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial \sigma}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \sigma}{\partial x} + p'(t) \left(1 - \frac{x}{l}\right) \frac{\partial \sigma}{\partial t} \right) dx dt = \int_0^1 \psi(x) \sigma(0, x) dx. \quad (14)$$

Отметим, что, как несложно проверить, тождество (14) будет справедливо для функций, имеющих достаточно большое число непрерывных частных производных. Поэтому можно сказать, что именно в этом тождестве происходит предельный переход в построенных нами сложных функциональных пространствах.

Соответственно равенство  $u(t, x) = w(t, x) + v(t, x)$  определяет обобщенное решение задачи (1)-(5).

## V. Критерий всюду оптимальности

Всюду оптимальным управлением на отрезке  $t \in [0; T]$  мы будем называть управление, оптимальное на каждом отрезке, лежащем внутри этого отрезка. Примеры, приведенные в работах [4]-[7], показывают, что в задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами всюду оптимальность управления вовсе не является следствием просто оптимальности. Видимо, невозможно дать необходимые и достаточные условия всюду оптимальности. Однако можно построить достаточные условия, при которых гарантируется всюду оптимальность.

Можно доказать, что управление  $p^{**}(t)$  будет всюду оптимальным, если выполнены условия:

1) Множество всех возможных управлений  $P$  является выпуклым множеством, содержащим нулевое управление.

2) Оптимальным является управление  $p^*(t)$ , минимизирующее квадратичный, положительно определенный функционал.

3) Найдется число  $\delta > 0$  такое, что на любом промежутке  $[t_1; t_2] \subset [0; T]$ , где  $t_2 - t_1 \leq \delta$ , существует единственное оптимальное управление.

4) Если  $p_{t_1 t_2}^*(t)$  является оптимальным управлением на промежутке  $[0; t_1]$ ,  $p_{t_1 t_2}^*(t)$  – оптимальным на  $[t_1; t_2]$ , где  $T \geq t_2 > t_1 \geq 0$ ,  $t_2 - t_1 \leq \delta$ , то управляющая функция  $p^*(t)$ , производная которой совпадает с производными функций  $p_{t_1}^*(t)$ ,  $p_{t_1 t_2}^*(t)$  при  $T = t_1$ , является оптимальным управлением на промежутке  $[0; t_2]$ .

Проверка этих условий была проведена в работе [6] для однородной струны. Для неоднородной струны ситуация выглядит в достаточной степени аналогичной, но все же нам пока не удалось в полной мере обосновать всюду оптимальность построенного управления. В то же самое время возникают сомнения в возможности проведения строгих доказательств. Это связано с тем, что мы вынуждены перейти к приближенным методам решения поставленных задач. Так как в этой ситуации мы не работаем с точным решением, сам факт всюду оптимальности может быть оценен путем проведения вычислительных экспериментов.

## VI. НЕЯВНАЯ РАЗНОСТНАЯ СХЕМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ (1)-(5)

Для однородной струны всюду оптимальное управление может быть построено в явном виде [4-7]. Для неоднородной струны применим разностный метод. Для этого введем одномерные сетки  $x_i = ih$ ,  $i = 0, 1, 2, 3, \dots, N_x$ ,  $t_j = jt$ ,  $j = 0, 1, 2, 3, \dots, N_t$  с шагами  $h = \frac{l}{N_x}$  по оси  $x$  и  $\tau = \frac{T}{N_t}$  по оси  $t$ . Соответственно порождается двумерная сетка  $(t_j; x_i)$ ,  $i = 0, 1, 2, 3, \dots, N_x$ ,  $j = 0, 1, 2, 3, \dots, N_t$ . В качестве искомой рассмотрим сеточную функцию  $u_i^j = u(t_j; x_i)$ , где  $i = 0, 1, 2, 3, \dots, N_x$ ,  $j = 0, 1, 2, 3, \dots, N_t$ . Для ее приближенного нахождения рассмотрим в области  $D = [0; T] \times [0; l]$  разностную схему, аппроксимирующую компоненты задачи (1)-(5) следующим образом.

При решении задач для гиперболических уравнений, аналогичных нашему уравнению (1) разностными методами часто ограничиваются явными разностными схемами. Эти схемы обеспечивают устойчивость вычислительного процесса при достаточно комфортных соотношениях шагов по времени и пространству. Здесь принципиальное отличие применения разностных методов для параболических и гиперболических уравнений. Тем не менее мы вынуждены отказаться от явных разностных схем, т.к. их применение лишает нас возможности найти сохраняющиеся инварианты разностных схем. Такие разностные инварианты, являющиеся аналогами энергии струны, дает возможность получить использование неявных разностных схем. При этом мы будем пользоваться глубокими идеями академика А.А. Самарского [8].

Уравнение (1) аппроксимируем разностным отношением

$$\begin{aligned} \Lambda_{tt} u_i^j &= \sigma_1 \Lambda_{xk\bar{x}} u_i^{j+1} + (1 - \sigma_1 - \sigma_2) \Lambda_{xk\bar{x}} u_i^j + \sigma_2 \Lambda_{xk\bar{x}} u_i^{j-1}, \\ i &= 1, 2, 3, \dots, N_x - 1, j = 1, 2, 3, \dots, N_t - 1. \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$\Lambda_{t\bar{t}} u_i^j = \frac{u_i^{j+1} - 2u_i^j + u_i^{j-1}}{\tau^2},$$

$$\Lambda_{xk\bar{x}} u_i^j = \frac{k_{i+0,5}(u_{i+1}^j - u_i^j) - k_{i-0,5}(u_i^j - u_{i-1}^j)}{2}.$$

Пусть решение искомой задачи найдено на  $j - 1$ -м и  $j$ -м временных слоях. Для нахождения решений поставленной задачи на  $j + 1$ -м временном слое с учетом соотношений (10) мы приходим к уравнениям

$$\begin{aligned} \frac{u_i^{j+1}}{\tau^2} + \sigma_1 \left( \frac{-k_{i-0,5}u_{i-1}^{j+1}}{2} + \left( \frac{(k_{i+0,5} + k_{i-0,5})u_i^{j+1}}{2} \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{k_{i+0,5}u_{i+1}^{j+1}}{2} \right) = \frac{2u_i^j}{\tau^2} - \right. \\ \left. - \frac{u_i^{j-1}}{\tau^2} - (1 - \sigma_1 - \sigma_2) \left( \frac{-k_{i-0,5}u_{i-1}^j}{2} \right. \right. \\ \left. \left. + \left( \frac{(k_{i+0,5} + k_{i-0,5})u_i^j}{2} \right) - \frac{k_{i+0,5}u_{i+1}^j}{2} \right) - \right. \\ \left. - \sigma_2 \left( \frac{-k_{i-0,5}u_{i-1}^{j-1}}{2} + \left( \frac{(k_{i+0,5} + k_{i-0,5})u_i^{j-1}}{2} \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \frac{k_{i+0,5}u_{i+1}^{j-1}}{2} \right), \right. \\ i = 1, 2, 3, \dots, NX1 = N_x - 1. \end{aligned}$$

Полученная система является трехдиагональной и может быть решена методом прогонки.

## VII. РАЗНОСТНЫЕ ТОЖДЕСТВА

Для получения разностного аналога энергетического тождества (9) преобразуем разностную схему (15) следующим образом. Умножим левую и правую части этого тождества на центральную разностную производную

$$\frac{u_i^{j+1} - u_i^{j-1}}{2\tau} \quad (16)$$

и просуммируем полученное соотношение по  $i = 1, 2, 3, \dots, NX1$ .

Для левой части (15) непосредственно проверяется соотношение

$$\Lambda_{t\bar{t}} u_i^j \cdot (u_i^j)_{t^\circ} = \frac{1}{2\tau} \left( \left( (u_i^j)_t \right)^2 - \left( (u_i^j)_{\bar{t}} \right)^2 \right). \quad (17)$$

Здесь

$$\Lambda_{t\bar{t}} u_i^j = \frac{u_i^{j+1} - 2u_i^j + u_i^{j-1}}{\tau^2}, \quad (u_i^j)_{t^\circ} = \frac{u_i^{j+1} - u_i^{j-1}}{2\tau},$$

$$(u_i^j)_t = \Lambda_t u_i^j = \frac{u_i^{j+1} - u_i^j}{\tau}, \quad (u_i^j)_{\bar{t}} = \Lambda_{\bar{t}} u_i^j = \frac{u_i^j - u_i^{j-1}}{\tau}$$

и равенство (17) может быть проверено непосредственно. Следовательно, справедливо равенство

$$\sum_{i=1}^{NX1} (u_i^j)_{t^\circ} \cdot \Lambda_{t\bar{t}} u_i^j = \frac{1}{2\tau} \sum_{i=1}^{NX1} \left( \left( (u_i^j)_t \right)^2 - \left( (u_i^j)_{\bar{t}} \right)^2 \right). \quad (18)$$

Для правой части (15) после умножения на (16) и применения формул разностного суммирования по частям и первой разностной формулы Грина [8] мы приходим к следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{NX1} (u_i^j)_{t^\circ} \cdot \Lambda_{xk\bar{x}} u_i^{j-1} \\ &= L_{t^\circ} u_i^j |_{N_x} \cdot k u_{x,i}^{j-1} |_{NX1} - L_{t^\circ} u_i^j |_0 \\ & \cdot (k u_x)_{x,i}^{j-1} |_0 - \\ & - \frac{1}{2\tau} \sum_{i=1}^{NX1} \left( \left( \frac{u_i^{j+1} - u_i^{j-1}}{2\tau} \right)_x \cdot (k u_i^{j-1})_x \right), \\ & \sum_{i=1}^{NX1} (u_i^j)_{t^\circ} \cdot \Lambda_{xk\bar{x}} u_i^j \\ &= L_{t^\circ} u_i^j |_{N_x} \cdot k u_{x,i}^j |_{NX1} - L_{t^\circ} u_i^j |_0 \\ & \cdot (k u_x)_{x,i}^j |_0 - \\ & - \frac{1}{2\tau} \sum_{i=1}^{NX1} \left( \left( \frac{u_i^{j+1} - u_i^{j-1}}{2\tau} \right)_x \cdot (k u_i^j)_x \right), \\ & \sum_{i=1}^{NX1} (u_i^j)_{t^\circ} \cdot \Lambda_{xk\bar{x}} u_i^{j+1} \\ &= L_{t^\circ} u_i^j |_{N_x} \cdot k u_{x,i}^{j+1} |_{NX1} - L_{t^\circ} u_i^j |_0 \\ & \cdot (k u_x)_{x,i}^{j+1} |_0 - \\ & - \frac{1}{2\tau} \sum_{i=1}^{NX1} \left( \left( \frac{u_i^{j+1} - u_i^{j-1}}{2\tau} \right)_x \cdot (k u_i^{j+1})_x \right). \end{aligned}$$

Подставляя полученные соотношения в (15), имеем

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\tau} \sum_{i=1}^{NX1} \left( \left( (u_i^j)_t \right)^2 - \left( (u_i^j)_{\bar{t}} \right)^2 \right) \\ & + \sigma_1 \sum_{i=1}^{NX1} \left( \left( \frac{u_i^{j+1} - u_i^{j-1}}{2\tau} \right)_x \cdot (k u_i^{j+1})_x \right) + \\ & + (1 - \sigma_1 - \sigma_2) \sum_{i=1}^{NX1} \left( \left( \frac{u_i^{j+1} - u_i^{j-1}}{2\tau} \right)_x \cdot (k u_i^j)_x \right) + \\ & + \sigma_2 \sum_{i=1}^{NX1} \left( \left( \frac{u_i^{j+1} - u_i^{j-1}}{2\tau} \right)_x \cdot (k u_i^{j-1})_x \right) \\ & = \sigma_1 L_{t^\circ} u_i^j |_{N_x} \cdot k u_{x,i}^{j+1} |_{NX1} + \\ & + (1 - \sigma_1 - \sigma_2) L_{t^\circ} u_i^j |_{N_x} \cdot k u_{x,i}^j |_{NX1} + \sigma_2 L_{t^\circ} u_i^j |_{N_x} \cdot k u_{x,i}^{j-1} |_{NX1} \\ & j = 1, 2, 3, \dots, N_t - 1. \end{aligned} \quad (19)$$

## VIII. РАЗНОСТНЫЕ ИНВАРИАНТЫ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Перейдем к изучению возможности построения оптимального управления, являющегося аналогом всюду оптимального управления, изученный нами в непрерывном случае. Будем искать те компоненты разностной схемы, которые влияют на минимизацию полученного разностного инварианта.

Для задачи (1)-(5) изучим эти величины и проанализируем их влияние. Полный анализ возникающей ситуации показывает, что в соотношении (19) управляющая функция  $p(t)$  входит явным образом в следующий набор слагаемых

$$L_t \circ u_i^j \Big|_{N_x} = \frac{p^{j+1} - p^{j-1}}{2\tau}, \quad k u_{x,i}^{j+1} \Big|_{N_x} = \frac{k_{NX-0.5}(p^{j+1} - u_{NX1}^{j+1})}{h},$$

$$k u_{x,i}^j \Big|_{N_x} = \frac{k_{NX-0.5}(p^j - u_{NX1}^j)}{h},$$

$$k u_{x,i}^{j+1} \Big|_{N_x} = \frac{k_{NX-0.5}(p^{j+1} - u_{NX1}^{j-1})}{h},$$

где  $p^j = p(t_j)$ .

Если управляющее воздействие отсутствует, т.е.  $p(t) = 0$ , то (19) принимает вид

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{NX1} ((u_i^j)_t)^2 + \sigma_1 \sum_{\substack{i=1 \\ NX1}}^{NX1} ((u_i^{j+1})_x \cdot (k u_i^{j+1})_x) + \\ & + (1 - \sigma_1 - \sigma_2) \sum_{i=1}^{NX1} ((u_i^{j+1})_x \cdot (k u_i^j)_x) \\ & + \sigma_2 \sum_{i=1}^{NX1} ((u_i^{j+1})_x \cdot (k u_i^{j-1})_x) = \\ & = \sum_{i=1}^{NX1} ((u_i^j)_t)^2 + \sigma_1 \sum_{\substack{i=1 \\ NX1}}^{NX1} ((u_i^{j-1})_x \cdot (k u_i^{j+1})_x) + \\ & + (1 - \sigma_1 - \sigma_2) \sum_{i=1}^{NX1} ((u_i^{j-1})_x \cdot (k u_i^j)_x) \\ & + \sigma_2 \sum_{i=1}^{NX1} ((u_i^{j-1})_x \cdot (k u_i^{j-1})_x) \\ & j = 1, 2, 3, \dots, N_t - 1. \end{aligned}$$

Сопоставляя полученное соотношение с (18), заметим, что для минимизации разностного аналога энергии струны

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{NX1} ((u_i^j)_t)^2 + \sigma_1 \sum_{\substack{i=1 \\ NX1}}^{NX1} ((u_i^{j+1})_x \cdot (k u_i^{j+1})_x) + \\ & + (1 - \sigma_1 - \sigma_2) \sum_{i=1}^{NX1} ((u_i^{j+1})_x \cdot (k u_i^j)_x) + \\ & + \sigma_2 \sum_{i=1}^{NX1} ((u_i^{j+1})_x \cdot (k u_i^{j-1})_x). \end{aligned} \quad (20)$$

необходимо минимизировать величину

$$\begin{aligned} & \sigma_1 \frac{p^{j+1} - p^{j-1}}{2\tau} \cdot k_{NX-0.5} \frac{p^{j+1} - u_{NX1}^{j+1}}{h} + \\ & + (1 - \sigma_1 - \sigma_2) \frac{p^{j+1} - p^{j-1}}{2\tau} \cdot k_{NX-0.5} \frac{p^j - u_{NX1}^j}{h} + \\ & + \sigma_2 \frac{p^{j+1} - p^{j-1}}{2\tau} \cdot k_{NX-0.5} \frac{p^{j-1} - u_{NX1}^{j-1}}{h}. \end{aligned} \quad (21)$$

Из (20), (21) следует, что данная величина является квадратным трехчленом относительно искомой величины  $p^{j+1}$ . Поэтому ее минимальное значение находится в явном виде как значение в вершине параболы ветвями вверх.

## IX. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показаны методы поиска управляющей сечечной функции при решении задачи оптимального управления разностными методами. Такие методы исследования представляются перспективными.

Проведены исследования поставленной задачи на возможность нахождения всюду оптимального управления. При этом обоснована необходимость перехода к численным методам решения задач для неоднородной струны.

В дальнейшем необходимо провести вычислительные эксперименты для анализа перспективности предложенных способов поиска оптимального управления системами с распределенными параметрами.

## ЛИТЕРАТУРА

- Ладыженская О.А. Краевые задачи математической физики. – М.: Наука, 1973.
- Латтес Р., Лионс Ж.-Л. Метод квазиобращения и его приложения. – М.: Мир, 1970.
- Ильин В.А., Мусеев Е.И. Оптимизация граничных управлений колебаниями струны // УМН. – 2005. – 60:6(366). – Р. 89-114; Russian Math. Surveys. – 2005. – 60:6. – Р. 1093-1119.
- Клово А.Г., Куповых Г.В., Ляпунова И.А. О возможности синтеза оптимального управления колебаниями струны // Международная научная конференция по дифференциальным уравнениям и динамическим системам: Тезисы докладов. – Владимир: Изд-во ВлГУ 2020. – 163 с. – С. 72-73.
- Клово А.Г., Куповых Г.В., Ляпунова И.А., Гончаров А.В. Пример построение всюду-оптимального управления колебаниями струны в явном виде // Материалы IV Международной научной конференции «Донецкие чтения 2020: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности». Т. 1 Физико-математические и технические науки. Ч. 1. – Донецк: ДонНУ, 2020. – С 32-36.
- Клово А.Г., Куповых Г.В., Ляпунова И.А. Математическая задача об оптимальном управлении струной // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 4, – С. 178-191.
- Куповых Г.В., Клово А.Г. Некоторые математические вопросы для задач оптимального управления // X Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: Сб. научных трудов. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – С. 79-85.
- Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983.

# Моделирование структуры приземного электрического поля и расчет коэффициента редукции вблизи неоднородной поверхности

**Тимошенко Дмитрий Владимирович**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[dmitrytim@sedu.ru](mailto:dmitrytim@sedu.ru)

**Кудринская Татьяна Владимировна**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[tvkudrinskaya@sedu.ru](mailto:tvkudrinskaya@sedu.ru)

**Клово Александр Георгиевич**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[klovoag@mail.ru](mailto:klovoag@mail.ru)

**Куповых Геннадий Владимирович**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[kupovukh@sedu.ru](mailto:kupovukh@sedu.ru)

**Аннотация.** В приближении электродного эффекта в атмосфере методами математического моделирования исследованы распределения напряженности электрического поля вблизи поверхности плоского электрода и при наличии сферической неоднородности. Для случаев классического и турбулентного электродного эффекта в приземном слое рассчитаны значения коэффициента редукции вблизи неоднородного участка и исследована их зависимость от расстояния до поверхности электрода и значений электрического поля.

**Abstract.** In the approximation of the electrode effect in the atmosphere, the distributions of the electric field strength near the surface of a flat electrode and in the presence of spherical inhomogeneity are studied by mathematical modeling methods. For the cases of the classical and turbulent electrode effect in the surface layer, the values of the reduction coefficient near the inhomogeneous area are calculated and their dependence on the distance to the electrode surface and the values of the electric field is investigated.

**Ключевые слова:** электрическое поле, электродный эффект, коэффициент редукции, сферическая неоднородность, приземный слой.

**Keywords:** electric field, electrode effect, reduction coefficient, spherical inhomogeneity, surface layer.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Регулярные атмосферно-электрические наблюдения предусматривают унификацию данных наземных измерений напряженности (градиента потенциала) электрического поля за счет введения коэффициента редукции:  $K = E/E_0$ , значения которого зависят от геометрии установки датчиков ( $E_0$  – на равнине,  $E$  – в геометрически искаженных условиях), но также сильно меняются в различных физических условиях [1, 2]. В работе [3] экспериментально установлено, что с усилением электри-

ческого поля в равнинных условиях (в условиях близких к турбулентному электродному эффекту) значения коэффициента редукции уменьшаются, а в горных (классический электродный эффект) – возрастают. Причины разброса значений коэффициента редукции являются влияние электродного эффекта вблизи поверхности земли [1–4].

Существуют ряд теоретических работ, где при определенных допущениях и упрощениях получены аналитические распределения электрического поля для сложной геометрии электрода [5, 6]. В работах [7, 8] представлены распределения потенциала и электрического поля вблизи плоского электрода с расположенной на нем полусферой.

Цель настоящей работы – расчет значений коэффициента редукции в приближении классического и турбулентного электродного эффекта и анализ их распределения вблизи поверхности плоского электрода со сферической неоднородностью.

## II. РАСЧЕТ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ НЕОДНОРОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассмотрим далее случай, когда поверхность земли (электрод) содержит существенные неоднородности, которые необходимо учитывать на масштабе исследуемой области.

Для определения геометрического коэффициента редукции рассмотрим задачу в приближении классического электродного эффекта [4]:

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(n_1 b_1 \vec{E}) &= q(\vec{r}) - \alpha n_1 n_2, \\ -\operatorname{div}(n_2 b_2 \vec{E}) &= q(\vec{r}) - \alpha n_1 n_2, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\operatorname{div}\vec{E} = 4\pi e(n_1 - n_2), \vec{E} = -\operatorname{grad}\varphi, \quad \operatorname{rot}\vec{E} = 0,$$

в области  $[0; x_{max}] \times [0; z_\infty]$ .

При этом граничные условия для системы уравнений (1) зададим в виде:

$$E|_{z=0} = E_0, \quad E|_{z=z} = E, \quad n_1|_{z=z} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}, \quad n_2|_{z=0} = 0, \\ n_2|_{z=z} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}, \quad (2)$$

С учетом соотношения

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\operatorname{grad}\phi}, \quad (3)$$

систему (1)-(2) можно решить относительно функции потенциала электрического поля  $\phi$ . Данная величина является скалярной что, в известной степени, упрощает решение задачи.

Рассмотрим вначале третье уравнение системы (1), записанное через потенциал:

$$-\operatorname{div}\operatorname{grad}\phi = 4\pi e(n_1 - n_2),$$

или, в обозначениях оператора Лапласа:

$$\Delta\phi = -4\pi e(n_1 - n_2). \quad (4)$$

Граничные условия для уравнения (4) преобразуются в следующую форму:

$$\phi|_{z=0} = 0, \quad \phi|_{z=z} = \phi. \quad (5)$$

Исходя из теории классического электродного эффекта  $n_1 \approx \operatorname{const}$  [4], поэтому из первого уравнения системы (1) можно выразить величину  $n_2$  и получить уравнение относительно неизвестной функции  $\vec{E}$ :

$$\operatorname{div}\vec{E} = 4\pi e \left( n_1 - \frac{q - \operatorname{div}(n_1 b_1 \vec{E})}{\alpha n_1} \right), \quad (6)$$

которое преобразуется к виду

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi e(n_1 - \frac{q}{\alpha n_1})}{1 + \frac{4\pi e b_1}{\alpha}}. \quad (7)$$

Уравнение (7) таким образом является частным случаем уравнения (4) в условиях классического электродного эффекта, что позволяет решать задачу о распределении электрического поля относительно скалярной функции потенциала и сформулировать ее в виде уравнения Лапласа [9]:

$$\Delta\phi = -A. \quad (8)$$

Уравнение (7) и граничные условия (5) представляет собой задачу Дирихле для уравнения Лапласа во внешности круга [9].

Зададим форму электрода в виде полусфера (рис. 3). Тогда уравнение (8) удобно рассматривать в полярных координатах  $\phi = \phi(r, \theta)$  (рис. 1):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} = -A. \quad (9)$$



Рис. 1 Электрод (полусфера) в полярных координатах

Исходя из физического смысла задачи, будем решать ее в верхней полуплоскости ( $z \geq 0$ ).

В рассматриваемой системе координат первое из граничных условий (5) запишется следующим образом:

$$\phi(r, 0) = \phi(r, \pi) = 0. \quad (10)$$

Функцию  $\phi = \phi(r, \theta)$ , согласно методу Фурье [9], будем искать в виде ряда:

$$\phi = \sum_{n=1} R_n(r) \Phi_n(\theta). \quad (11)$$

В силу особенности граничных условий (10) функцию  $\Phi_n(\theta)$  можно рассматривать в качестве суммы тригонометрического ряда по синусам:

$$\Phi_n(\theta) = \sin n\theta.$$

Такое представление функции  $\Phi_n(\theta)$  позволяет удовлетворить граничным условиям и в то же время не ограничивает общность, поскольку в нижней полуплоскости задача не рассматривается (не возникает слагаемых с косинусами). Кроме того, не уменьшая общности, коэффициенты ряда в представлении (11) будем считать включенными в коэффициенты соответствующего ряда для функции  $R(r)$ . Отметим, что второе из граничных условий (5) можно записать в виде:

$$\phi( , \theta) = C_1, \quad C_1 = \operatorname{const}, \quad (12)$$

где правую часть, в свою очередь, также можно представить в виде ряда по синусам:

$$\Phi( , \theta) = C_1 = \sum_{n=1} d_n \sin n\theta. \quad (13)$$

Коэффициент  $d_n$  определяет второе граничное условие для функции  $R(r)$  при построении соответствующего ряда:

$$R_n|_{r=r_0} = 0, \quad R_n|_{r=0} = d_n.$$

Подстановка ряда (13) в уравнение (11) приводит к соотношению

$$\sum_{n=1} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial R_n(r)}{\partial r} \right) \Phi_n(\theta) + \sum_{n=1} \frac{R_n(r)}{r^2} (-n^2 \Phi_n(\theta)) = -A,$$

где правую часть также необходимо представить в виде ряда по системе собственных функций, что позволит получить уравнение для нахождения неизвестных функций  $R_n(r)$ .

Записывая правую часть уравнения (8) в виде:

$$-A = \sum_{n=1} g_n \sin n\theta, \quad (14)$$

где коэффициенты  $d_n$  имеют вид:

$$g_n = -\frac{2A}{\pi n} (1 - (-1)^n).$$

Таким образом, получаем уравнение для определения функций  $R_n(r)$ :

$$R_n(r) + \frac{1}{r} R_n(r) - \left( \frac{n}{r} \right)^2 R_n(r) = -\frac{2A}{\pi n} (1 - (-1)^n). \quad (15)$$

Уравнение (15) представляет собой уравнение Эйлера [9], которое можно решить с помощью замены переменной  $r = e^t$ , приводящей его к неоднородному уравнению второго порядка относительно функций  $R_n(r)$ .

После соответствующих преобразований общее решение уравнения (15) записывается в виде:

$$R_n(r) = C_2 r^{-n} - \frac{2A}{\pi n(4-n^2)} (1 - (-1)^n) r^2. \quad (16)$$

Постоянную  $C_2$  в соотношении (16) определим из соответствующего граничного условия для функций  $R_n(r)$ :

$$C_2 = \frac{2A}{\pi n(4-n^2)} (1 - (-1)^n) r_0^{n+2}.$$

В соответствии с представлением (11), окончательное выражение для потенциала электрического поля будет иметь вид:

$$\varphi = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{2A}{\pi n(4-n^2)} (1 - (-1)^n) r_0^{n+2} r^{-n} - \frac{2A}{\pi n(4-n^2)} (1 - (-1)^n) r_0^{n+2} \sin n\theta \right]. \quad (17)$$

Для дальнейшего анализа распределения напряженности поля необходимо, пользуясь соотношением (3), совершив обратный переход от скалярной функции потенциала электрического поля к вектор-функции напряженности. С этой целью воспользуемся формулой для градиента в полярных координатах:

$$\overrightarrow{\text{grad } \varphi} = \frac{\partial \varphi}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \vec{e}_{\theta},$$

Эта формула справедлива для функций в виде конечных соотношений, мы же получили выражение для потенциала электрического поля в виде ряда Фурье. Это, с одной стороны, позволяет говорить о полченной дифференцируемости правой части соотношения (17), но с другой стороны, возникает возможность появления погрешности при вычислении производной, взятой только от конечного приближения ряда и от аналитического выражения функции – поскольку операция дифференцирования приближенного выражения может в данном случае оказаться некорректной – малые изменения функции могут приводить к существенным скачкам производной. Для проверки возможной погрешности и ее оценки можно провести сравнение значений производной, посчитанной осредненно и рассчитанной аналитически.

Окончательно для исследования структуры электрического поля вблизи электрода со сферической неоднородностью осуществляется обратный переход от выражения для потенциала к представлению напряженности электрического поля как функции координат в декартовой системе координат. Получаем выражение:

$$E = -\text{grad} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{2A}{\pi n(4-n^2)} (1 - (-1)^n) r_0^{n+2} (\sqrt{x^2 + z^2})^{-n} - \frac{2A}{\pi n(4-n^2)} (1 - (-1)^n) (x^2 + z^2) \right] \frac{z}{\sqrt{x^2 + z^2}} \quad (18)$$

Вычисления проводились в системе MATLAB. Трехмерное распределение напряженности поля как вблизи области неоднородности электрода, так и на значительном удалении от нее приведены на рис. 2 при значении напряженности электрического поля  $E_0 = -100 \text{ В/м}$  в плоской части электрода [7, 8].

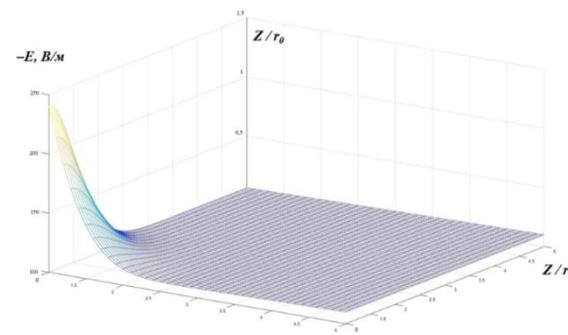


Рис. 2 Распределение электрического поля вблизи электрода со сферической неоднородностью ( $E_0 = -100 \text{ В/м}$ )

### III. КОЭФФИЦИЕНТ РЕДУКЦИИ ВБЛИЗИ НЕОДНОРОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДА

В приближении электродного эффекта [2, 4, 7] выражение для коэффициента редукции электрического поля  $K_p$  можно записать в виде:

$$K_p = K_1 K_2 \quad (19)$$

где  $K_1 = E_e/E_0$  – коэффициент искажения электрического поля, в традиционном понимании, обусловленный геометрией электрода;  $E_e$  – значение напряженности электрического поля в рассматриваемой точке вблизи сферического электрода,  $E_0$  – значение вдали от него (плоский электрод),  $K_2$  – коэффициент, обусловленный электродным эффектом. Далее, рассмотрим отдельно случаи классического и турбулентного электродного эффекта [4] в приземном слое атмосферы.

**Классический электродный эффект.** Для напряженности электрического поля на плоском участке электрода ( $E_0 = -100 \text{ В/м}$  и  $-500 \text{ В/м}$ ) на основе решения (17) получены значения коэффициента  $K_1$  и коэффициента редукции  $K_p$  в зависимости от расстояния между точкой наблюдения по горизонтали от края полусферы ( $l$ ) и по вертикали от ее вершины ( $h$ ) участком неоднородности.

Рис. 3 и 4 построены для значений коэффициента  $K_1$  для различных значений электрического поля. Представленные рисунки демонстрируют уменьшение влияния геометрических искажений поля и, следовательно, уменьшение значений  $K_1$  и по мере удаления от участка неоднородности по вертикали и по горизонтали. На рис. 4 заметно, что при увеличении электрического поля  $E_0$  значения коэффициента  $K_1$  возрастают.

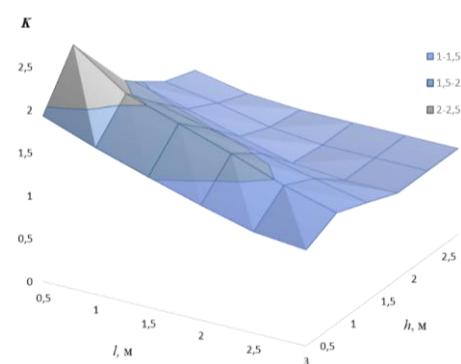


Рис. 3. Значения коэффициента  $K_1$  при  $E_0 = -100 \text{ В/м}$

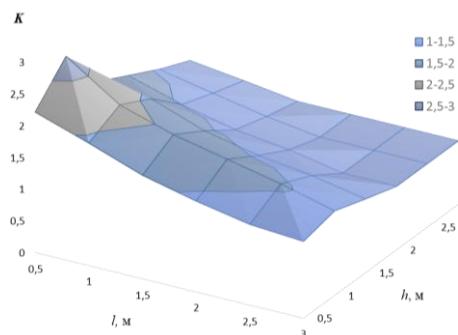


Рис. 4 Значения коэффициента  $K_1$  в сильном электрическом поле ( $E_0 = -500 \text{ B/m}$ )

Исследуем поведение коэффициента редукции, получаемого по формуле (19) с учитывает влияние классического электродного эффекта. Значения коэффициента  $K_2$  рассчитаны по модели классического электродного эффекта вблизи плоского электрода [4] при различных значениях  $E_0$  и скорости ветра ( $u$ ) приведены в табл. 2, 3.

ТАБЛИЦА 1. ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА  $K_2$  ПРИ РАЗНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ [4]

$h, \text{ м}$	$E_0 = -100 \text{ B/m}$	$E_0 = -500 \text{ B/m}$
0	1	1
0,5	0,8	0,95
1	0,7	0,9
1,5	0,6	0,87
2	0,55	0,85
2,5	0,5	0,82
3	0,48	0,8
3,5	0,45	0,77
4	0,45	0,74
4,5	0,45	0,72
5	0,45	0,7

Расчетные значения коэффициента редукции  $K_p$  при различных значениях напряженности электрического поля  $E_0$  представлены на графиках (рис. 5 и 6).

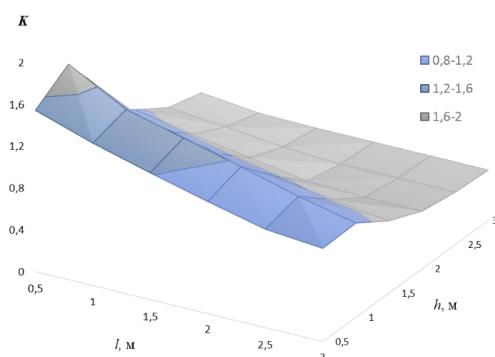


Рис. 5. Значения коэффициента редукции  $K_p$  при  $E_0 = -100 \text{ B/m}$

Сравнение графиков, представленных на рис. 3, 4 и рис. 5, 6 показывают уменьшение значений  $K_p$ , по сравнению с  $K_1$ . А при усилении электрического поля  $E_0$  происходит увеличение значений  $K_p$ , что является следствием влияния классического электродного эффекта.

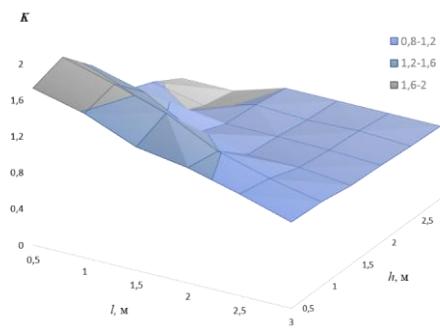


Рис. 6. Значения коэффициента редукции  $K_p$  при  $E_0 = -500 \text{ B/m}$

**Турбулентный электродный эффект.** Значения коэффициента  $K_2$ , рассчитанные по модели турбулентного электродного эффекта вблизи плоского электрода [4] при различных значениях  $E_0$  и скорости ветра ( $u$ ) приведены в табл. 2, 3.

ТАБЛИЦА 2. ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА  $K_2$  ПРИ ЗНАЧЕНИИ  $E_0 = -100 \text{ B/m}$  И РАЗНЫХ СКОРОСТЯХ ВЕТРА

$h, \text{ м}$	$u = 1 - 2 \text{ м/с}$	$u = 5 - 6 \text{ м/с}$	$h, \text{ м}$	$u = 1 - 2 \text{ м/с}$	$u = 5 - 6 \text{ м/с}$
0	1	1	3	0,63	0,85
0,5	0,85	0,98	3,5	0,62	0,83
1	0,8	0,94	4	0,6	0,82
1,5	0,75	0,9	4,5	0,58	0,8
2	0,7	0,88	5	0,57	0,79
2,5	0,67	0,87	-	-	-

ТАБЛИЦА 3. ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА  $K_2$  ПРИ ЗНАЧЕНИЯХ  $E_0 = -500 \text{ B/m}$ ,  $u = 5 - 6 \text{ м/с}$

$h, \text{ м}$	$u = 5 - 6 \text{ м/с}$	$h, \text{ м}$	$u = 5 - 6 \text{ м/с}$
0	1	3	0,85
0,5	0,96	3,5	0,83
1	0,95	4	0,82
1,5	0,92	4,5	0,79
2	0,9	5	0,77
2,5	0,87	--	--

На рис. 7 представлены значения коэффициента редукции  $K_p$  при различных скоростях ветра ( $u$ ). Коэффициент редукции рассчитан по формуле (19), при этом значения  $K_2$  взяты из табл. 2.

Сравнение графиков, представленных на рисунках 7<sub>a</sub> и 7<sub>b</sub>, показывают увеличение значений коэффициента редукции ( $K_p$ ) при увеличении скорости ветра. В среднем значения  $K_p$  при скорости ветра  $u = 6 \text{ м/с}$  на 20% больше, чем при скорости  $u = 1 \text{ м/с}$ .

Рис. 8 демонстрирует значения коэффициента редукции  $K_p$  в зависимости от расстояния между точкой наблюдения по горизонтали ( $l$ ) и по вертикали участка неоднородности ( $h$ ) при условии сильного электрического поля. Значения  $K_2$  взяты из табл. 3.

Исходя из представленного графика можно отметить, что при усилении электрического поля  $E_0$  также наблюдается увеличение значений  $K_p$ , как и при классическом электродном эффекте.

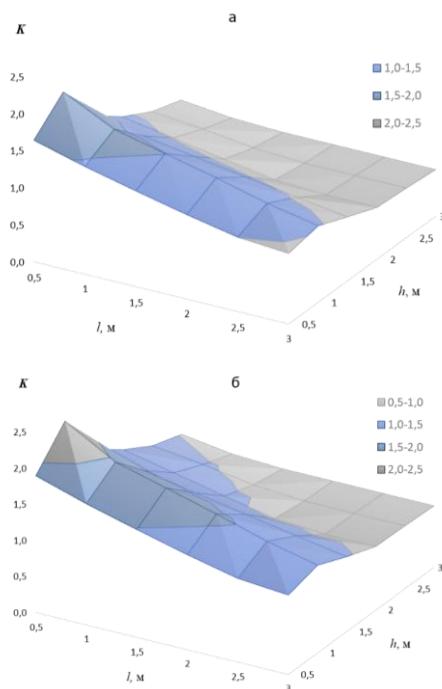


Рис. 7. Значения коэффициента редукции  $K_p$  при разных скоростях ветра: а)  $u = 1-2 \text{ м/с}$ ; б)  $u = 5-6 \text{ м/с}$

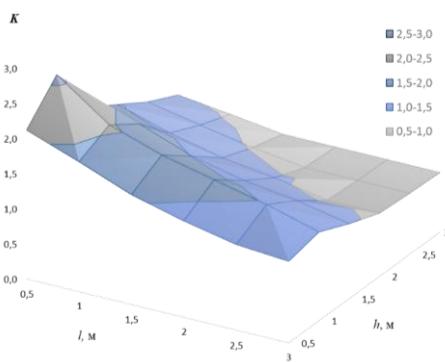


Рис. 8. Значения коэффициента редукции  $K_p$  в сильном электрическом поле ( $E_0 = -500 \text{ В/м}$ ,  $u = 5 \text{ м/с}$ )

В среднем значения коэффициента редукции  $K_p$  для условия сильного электрического поля при турбулентном электродном эффекте больше, чем при классическом: на 27% – вблизи и менее 10% – вдали от участка неоднородности.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аналитическим способом построено пространственное распределение и исследована структура атмосферного электрического поля вблизи плоского электрода со

сферической неоднородностью. Для расчета коэффициента редукции электрического поля предложено использовать одновременно геометрический коэффициент искажения электрического поля и коэффициент, учитывающий влияние электродного эффекта вблизи поверхности земли. Выполнены расчеты значений коэффициента редукции в окрестностях сферической неоднородности поверхности для случаев классического и турбулентного электродного эффекта. Установлено влияние на значения коэффициент редукции и их распределение метеорологических факторов и измеряемого электрического поля.

Для правильной интерпретации результатов наземных атмосферно-электрических наблюдений с учетом коэффициента редукции необходимо принимать во внимание не только геометрию установки датчиков, но и действие электродного эффекта на получаемые значения электрического поля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Куповых Г.В., Шефтель В.М., Ярошенко А.Н. К вопросу определения коэффициента редукции при измерении атмосферного электрического поля в приэлектродном слое // Труды ВГИ. – М.: Гидрометеоиздат, 1989. – Вып. 76. – С. 66-69.
2. Мартынов А.А., Куповых Г.В. О связи значений напряженности электрического поля атмосферы, измеренных на различных высотах у земли // Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. – Нальчик, 1990. – С. 45.
3. Kuprovkh G.V., Kudrinskaya T.V., Timoshenko D.V., Klovo A.G. Electric field measurements at mountain stations in Baksan gorge and on Cheget peak (Elbrus region) // CATPID-2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – Vol. 698 (2019) 044035. – 6 p.
4. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере: монография. – Таганрог. Изд-во ТРТУ. – 1998. – 123 с.
5. Tuomi T.J. The atmospheric electrode effect over snow // J. Atm. and Terr. Phys. – 1982. – Vol. 44. – P. 737-745.
6. Калита В.М., Лапухов А.И., Москаленко А.М. и др. Распределение электрического поля, объемного заряда и концентрации ионов в атмосфере вблизи заряженных тел // В кн.: Физические процессы в ионосфере и магнитосфере. – М.: Изд-во АН СССР, 1984. – С. 110-115.
7. Kudrinskaya T.V., Klovo A. G., Kuprovkh G.V., Timoshenko D.V. Reduction coefficient and electric field near plane electrode with geometric heterogeneity // Journal of Physics: IOP Conf. Series. VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity. – 1604 (2020) 012005. – 8 p.
8. Клово А.Г., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Свидельский С.С., Тимошенко Д.В. Распределение напряженности атмосферного электрического поля и потенциала вблизи плоского электрода со сферической неоднородностью // Материалы VI Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2020. – С. 279-283
9. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972. – 736 с.

# Об одной модификации модели боевых действий

**Ляпунова Ирина Артуровна**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*ialyapunova@sfedu.ru*

**Фоменко Наталья Алексеевна**  
Российский государственный университет  
нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина  
Москва, Россия  
*fomenko.nata.alex@gmail.com*

**Аннотация.** В современном мире информационные системы широко внедряются в различные области жизни общества, в том числе в военное обеспечение. В этой области большая роль отводится математическому моделированию. В настоящее время для моделирования боевых действий используются имитационные системы, в основу которых положены смешанные разнородные дискретные уравнения Ланчестера. В работе построены и исследованы модели боевых действий двух регулярных армий.

**Abstract.** In the modern world, information systems are widely implemented in various areas of society, including military support. In this area, mathematical modeling plays an important role. At present, simulation systems are used to simulate combat operations, which are based on mixed heterogeneous discrete Lanchester equations. In this work have been constructed and investigated model of combat operations of two regular armies.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, ланчестерские модели, боевые действия, регулярная армия.

**Keywords:** mathematical modeling, Lanchester model, combat operations, regular armies.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Математические методы при планировании боя (сражения) и для изучения природы военных действий применяются с давних времен. Существует множество различных видов моделей, описывающих возникновение и динамику протекания вооруженных конфликтов рис.1. В их основе различные принципы, относящиеся к различным областям математического моделирования, теории вероятностей и математической статистики, логики и алгоритмизации – теория игр, имитационное моделирование, генетические и роевые алгоритмы и т.д. Но для эффективного прогнозирования наиболее подходящими являются математические модели, в основе которых лежат дифференциальные уравнения, поскольку с помощью именно дифференциала можно эффективно описать динамику изменения чего-либо. Наиболее известными моделями войн и вооруженных конфликтов, основанных на дифференциальных уравнениях, являются ланчестерские модели.

В настоящее время для моделирования боевых действий используются также имитационные системы, в основу которых положены смешанные разнородные дискретные уравнения Ланчестера как указано в работе [1]. В частности, имитационная система JTLS (Joint

Theater Level Simulation) применяется вооруженными силами США и НАТО в различных областях военного строительства и подготовки войск, что позволяет решать следующие задачи:

- исследование, развитие и оценка планов применения группировок вооруженных сил;
- сравнительная оценка альтернативных вариантов боевого применения войск (сил);
- анализ структуры и состава боевых и обеспечивающих формирований, имеющих на вооружении различные образцы вооружений;
- проведение командно-штабных учений, военных игр и других мероприятий в системе оперативной подготовки объединенных и коалиционных (многонациональных) штабов и пр.



Рис. 1. Виды математических моделей боевых действий

Как ведущие государства, так и страны третьего мира тратят значительные финансовые средства на вооружение и создание технологических систем коммуникаций, разведки и вычислений на поле боя, повышая ситуационную осведомленность командования и эффективность боевых подразделений.

## II. ОБЗОР ЛАНЧЕСТЕРСКИХ МОДЕЛЕЙ

В наиболее общем виде ланчестерские модели [2] можно описать уравнением (1):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = ax + bxy + cy + d \\ \frac{dy}{dt} = ey + fyx + gx + h \end{cases}, \quad (1)$$

где  $a$  и  $e$  определяют скорость небоевых потерь;  $b$  и  $f$  – скорость потерь из-за воздействия по площадным целям;  $c$  и  $g$  – потери от воздействия противника на переднем крае;  $d$  и  $h$  – подходящие или отходящие резервы.

Для определения жертв войн, действительных или потенциальных, наибольшее значение имеют следующие четыре модели.

1. Модель Ланчестера (имеются только коэффициенты  $b$  и  $f$ ). В этом случае количество жертв пропорционально количеству встреч между индивидуумами противоборствующих сторон (произведение численности сторон:  $x \times y$ ). Наиболее актуально подобное взаимодействие тогда, когда две стороны располагаются на общей территории (партизанская война, репрессии, вражда двух этносов и т.д.).

2. Модель Осипова (коэффициенты  $a$  и  $e$ ). Количество жертв пропорционально численности противоположной стороны. Это может быть классическое военное взаимодействие, когда две стороны контактируют лишь на переднем крае.

3. Модель Петерсона (коэффициенты  $a$  и  $e$ ). Количество жертв определяется численностью своей стороны. Это может быть моделью холодной войны, когда чем больше своих подводных лодок несут боевое дежурство, тем больше их гибнет.

4. Модель Брекни (коэффициенты  $a$  и  $f$  либо  $b$  и  $e$ ). Жертвы одной стороны пропорциональны количеству встреч, а другой – численности ее противника. Модель была создана под впечатлением боевых действий во Вьетнаме и довольно удовлетворительно описывает конфликт, в котором одна из сторон ведет классическую войну, а вторая – партизанскую.

С широким распространением персональных компьютеров появилась тенденция использовать ланчестерские модели для анализа исторической информации. Однако большинство работ ограничиваются описанием лишь одного-двух конкретных конфликтов. Так, в своих работах [3–6] Дж. Там моделирует Арденнскую операцию, Дж. Энжел – операцию на Иводзиме, П. Морсе и Г. Кимбол – битву за Атлантику и т. п. Вероятно, первыми работами на русском языке по этой теме были предельно лаконичные публикации журнала «Техника молодежи», предлагающие подходы для моделирования Ледового побоища, Куликовской битвы и некоторых других сражений древности [7–9]. Все они отмечают удивительное схождение результатов, полученных по модели, с доступными историческими сведениями.

Жертвы одной стороны пропорциональны количеству встреч, а другой – численности ее противника. Модель была создана под впечатлением боевых действий во Вьетнаме и довольно удовлетворительно описывает конфликт, в котором одна из сторон ведет классическую войну, а вторая – партизанскую.

### III. КОЭФФИЦИЕНТ БОЕВЫХ ПОТЕРЬ

Боевые потери вызваны огневым воздействием противника и своим огнем (по американской терминологии – «дружественным огнем»). Они определяются силой противника, собственной силой, окружающей средой и человеческим фактором (называемым в разных источ-

никах «лидерством», «моралью», «степенью удачи» и т.п.). Командующие также могут некоторым образом влиять на боевые потери.

Боевые потери подразделяются на «убитых», «раненых» и «без вести пропавших». Под убитыми принято понимать погибших непосредственно от воздействия противника или раненых в бою, но умерших на поле боя, не дождавшись оказания им медицинской помощи. Статистику по умершим можно получить через похоронную службу. Обычно в боевых частях заботятся о захоронении убитых как для поднятия собственной морали, так и для предотвращения инфекционных заболеваний.

Под ранеными понимают людей, пострадавших при ведении боевых действий и поступивших в различные медицинские структуры. В зависимости от тяжести боя (боевые потери к первоначальной численности) растет количество тяжелораненых, и наоборот, при коротких боях среди раненых будет большая доля легкораненых. Основная масса раненых возвращается в строй в течение первых десяти дней лечения. Для остальных требуется, как правило, длительное лечение с возможной эвакуацией.

Среди раненых выделяются четыре основные группы: возвращенные в строй, умершие от ран, переведенные в другие медицинские учреждения (эвакуированные), уволенные из вооруженных сил. Поэтому принято также выделять понятие «безвозвратные потери», куда кроме убитых входят еще умершие от ран и уволенные в запас.

Под без вести пропавшими понимается личный состав, который не числится среди убитых или раненых, но отсутствует при поверке после боя. Чаще всего это захваченные в плен, вошедшие в состав «дружественных частей», дезертировавшие. Поэтому среди пропавших без вести выделяют пять основных групп: вернувшиеся в строй, убитые, раненые, военнопленные и дезертировавшие.

Методика расчета коэффициента боевых потерь предложена Дюпюи и получена им в результате обработки статистической информации по более чем 250 сражениям разного периода XIX–XX веков (из них 73 сражения для периода с 1945 года) [10–11]. По заявленным сражениям она дает расхождение не более 5 %, но с учетом всего спектра возможных битв методика дает максимальное расхождение не более 50 %. Итак,

$$c = C \cdot \prod_{j=1}^m k_j ,$$

где  $C$  – коэффициент средних дневных потерь в кампании. По данным Дюпюи, для операций уровня дивизии (примерно 15 000 человек) в XIX веке (Наполеоновские войны, Гражданская война в Соединенных Штатах и т.д.) [12] эта цифра составляла примерно 45 % в сутки, для Первой мировой войны – около 12 %, для Второй мировой войны – 4 %, для современных войн (по опыту арабо-израильских войн с 1967 по 1973 годы) – 2 %. Поэтому, например, для Первой мировой войны  $C = 0,12$ .

Что касается поправочных коэффициентов  $k_j$ , то Дюпюи выделяет их семь, Эверсон говорит о дополнительном факторе – активности операции  $k_1$ . Есть смысл

учитывать его тогда, когда получен приказ типа «взять любой ценой». В этом случае нормальное течение «среднестатистического» боя может нарушаться, что активизирует потери как с одной, так и с другой стороны. Кроме того, наоборот, может наблюдаться вялое течение операции, когда развитие событий идет не спеша и потери намного меньше тех, что могли бы быть. Поскольку данный фактор носит практически всегда субъективный характер, Эверсен рекомендует использовать его как случайную поправку.

Топографический фактор  $k_2$  определяет влияние особенностей ландшафта на потери. Чем сложнее рельеф местности, тем, как правило, ниже потери.

Погодный фактор  $k_3$  способен затруднить использование оружия. Минимальное его значение наблюдается при густом снегопаде и низкой температуре (0,3), максимальное – при умеренной температуре и сухой солнечной погоде (1,0). При моросящем дожде коэффициент достигает 0,7, а при ливне – 0,5.

Фортifikационный фактор  $k_4$  определяет влияние укрепленности позиций на снижение потерь у оборононующихся и увеличение потерь у атакующих.

Фактор собственных сил  $k_5$  признает, что чем слабее наши силы, тем выше потери мы несем. Это своего рода обратная связь: чем меньше каждый отдельный солдат видит своих, тем ниже его воля к победе и стремление продолжать бой. Косвенно данный коэффициент характеризует и степень выбывания офицеров.

Фактор превосходства  $k_6$  характеризует количество потенциальных встреч нашего огня и целей противника, то есть чем больше силы противника, тем больше вероятность их поражения. В ланчестерском уравнении это коэффициент воздействия по площадным целям. Если преимущество над противником подавляющее, то возрастает вероятность двойного или даже тройного поражения одних и тех же целей. И наоборот, если противник обладает подавляющим превосходством, то даже случайно посланный снаряд может поразить какую-нибудь цель.

Фактор внезапности  $k_7$  применяется тогда, когда нападение одной из сторон стало полной внезапностью для другой. Поскольку вопрос о внезапности обычно является очень спорным, применять данный фактор следует очень осторожно.

Под небоевыми потерями обычно подразумевают заболевших и пострадавших от несчастных случаев. Выделяются три главные категории: больные, душевнобольные, покалеченные.

Под «болезнью» понимается болезнь, вызванная бактериями, вирусами, паразитами и другими микроорганизмами. Среди больных выделяются три основные группы: истощенные болезнью, сильно истощенные болезнью, умершие по болезни. До XX века болезни были главным фактором, влияющим на боеспособность армии, но современные медицина и санитария сделали этот вид потерь относительно незначительным в общей структуре потерь.

«Душевная болезнь» – форма болезни, вызванная эмоциональными или психологическими травмами. Интересно отметить, что если во время Первой мировой войны практиковался термин «военный невроз» (shellshock), то во Второй мировой войне – «боевое утомление» (fatigue), но суть осталась той же. Обычно долю душевнобольных связывают с общим моральным состоянием войск, усталостью от войны. Этот вид небоевых потерь редко фатален (обычно самоубийства не превышают долей процента), но тем не менее может привести к неспособности личного состава выполнить боевую задачу.

«Покалеченные» обычно являются жертвами разного рода несчастных случаев. Они подразделяются на умерших от травм, госпитализированных, вернувшихся в строй и уволенных в запас.

В период до XVIII–XIX веков значительно больше офицеров и солдат умирали от болезней, чем от неприятельского огня. Поэтому частная форма ланчестерской модели в форме модели Петерсона в данном случае была как никогда актуальной. Массовое скопление людей на небольших пространствах при отсутствии элементарных средств борьбы с эпидемиями приводило к тому, что огромное количество солдат умирало от инфекционных заболеваний. Даже после XIX века, когда эпидемиология сделала значительные успехи, еще много солдат оказывались жертвами эпидемий. Чума во время русско-турецкой войны 1828–1829 годов, холера и тиф в Крымскую войну, оспа во франко-прусскую нанесли ощутимый урон противоборствующим сторонам. Б.Ц. Урланис [13], ссылаясь на журнал Общественный врач за 1915 год, приводит слова доктора Л.А. Тарасевича: «Число убитых микробами значительно превышает число убитых оружием» [14–16].

#### IV. БОЕВЫЕ ДЕЙСТВИЯ ДВУХ РЕГУЛЯРНЫХ АРМИЙ

Основной характеристикой соперников в приведенных ниже моделях являются численности сторон  $N_1(t) \geq 0$  и  $N_2(t) \geq 0$ . Если в какой-то момент времени одна из численностей обращается в нуль, то данная сторона считается потерпевшей поражение (притом, что в этот момент численность другой стороны положительна).

В случае действий между регулярными частями динамика их численности определяется тремя факторами:

- 1) скоростью уменьшения состава из-за причин, непосредственно не связанных с боевыми действиями (болезни, травмы, дезертирство);
- 2) темпом потерь, обусловленных боевыми действиями противоборствующей стороны (которые в свою очередь определяются качеством ее стратегии и тактики, уровнем морального духа и профессионализмом бойцов, вооружениями и т. д.);
- 3) скоростью поступления подкреплений, которая считается некоторой заданной функцией времени.

При этих предположениях для  $N_1(t)$ ,  $N_2(t)$  получаем систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = -\alpha_1(t) N_1 - \beta_2(t) N_2 + \gamma_1(t) \\ \frac{dN_2}{dt} = -\alpha_2(t) N_2 - \beta_1(t) N_1 + \gamma_2(t) \end{cases}, \quad (2)$$

из которой при заданных функциях  $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2$  и начальных значениях  $N_1(0), N_2(0)$ , однозначно определяется решение в любой момент времени  $t > 0$ . В (1) коэффициенты  $\alpha_{1,2}(t) > 0$  характеризуют скорости потерь в силу обычных (не боевых) причин,  $\beta_{1,2}(t) > 0$  – темпы потерь из-за действий соперника  $\gamma_{1,2}(t) > 0$  – скорости поступления подкреплений.

Изучим модель (1) (модель Ланчестера) в частном случае:  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$  (стороны не получают подкреплений и как бы предоставлены самим себе)  $\alpha_1 = \text{const}, \beta_1 = \text{const}, \alpha_2 = \text{const}, \beta_2 = \text{const}$ , (последнее означает, в частности, что у противников всегда найдется достаточное количество вооружений, которое может использоваться годными к несению службы бойцами).

Модель (2) становится автономной и принимает вид

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = -\alpha_1 N_1 - \beta_2 N_2, \\ \frac{dN_2}{dt} = -\alpha_2 N_2 - \beta_1 N_1, \end{cases} \quad (3)$$

Из уравнений (3) видно, что в данном случае численности сторон с течением времени могут только убывать. Временной характер этого процесса и какая сторона потерпит поражение – вопросы, требующие отдельного изучения. Введём еще одно упрощение (вполне оправданное для краткосрочных кампаний): положим  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ . Другими словами, потери сторон определяются лишь действиями противника (без учета внутренних конфликтов, болезней и т.д.). Система (3) упрощается:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = -\beta_2 N_2, \\ \frac{dN_2}{dt} = -\beta_1 N_1, \end{cases} \quad (4)$$

и легко находится ее интеграл:

$$\beta_1 N_1^2(t) - \beta_2 N_2^2(t) = \beta_1 N_1^2(0) - \beta_2 N_2^2(0) = C, \quad (5)$$

Из (5) однозначно определяется победитель рис. 2. При  $C > 0$  побеждает первая армия, при  $C < 0$  – вторая, в случае  $C = 0$  стороны уничтожают друг друга одновременно, и победителя нет.

Смысл этих результатов вполне ясен из вида константы в (5).

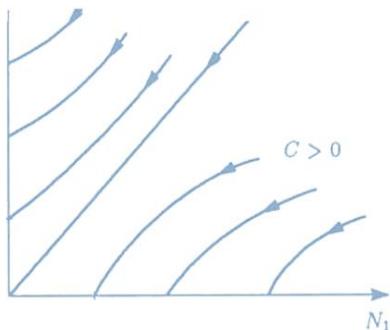


Рис. 2. Решение модели (4)-(5)

Для победы важна не только численность сторон в начале боевых действий ( $N_1(0), N_2(0)$ ), но и их выучка, качество их вооружений и т. д. (т.е. коэффициенты  $\beta_1, \beta_2$ ). Так, если  $C > 0$ , следовательно  $\beta_1 N_1^2(0) > \beta_2 N_2^2(0)$

и для достижения победы второй стороне следует либо увеличить начальную численность, либо улучшить качество боевых действий, либо то и другое одновременно. Заметим, что эффект от увеличения коэффициента  $\beta_2$  меньше, чем от такого же увеличения  $\beta_1$  ( $N_2(0)$ , которое входит в последнее неравенство (так называемый квадратичный закон боевых действий) во второй степени).

Дифференцируя первое из уравнений (4) и принимая во внимание второе, получаем уравнение для  $N_1(t)$ :

$$\frac{d^2 N_1}{dt^2} = \beta_1 \beta_2 N_2. \quad (6)$$

Из (6) с учетом начальных условий  $N_1(t=0) = N_1(0)$  и  $dN_1 dt|_{t=0} = -\beta_2 N_2(0)$  находим численность первой армии как функцию времени:

$$N_1(t) = N_1(0) ch \sqrt{\beta_1 \beta_2 t} - N_2(0) \sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_2}} sh \sqrt{\beta_1 \beta_2 t}, \quad (7)$$

Построим график зависимостей армий друг от друга рис. 3.

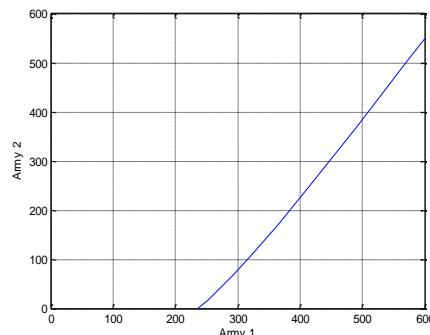


Рис. 3. Зависимость армий друг от друга

Как видим из графика, зависимость армий друг от друга только возрастает, что логично, поскольку в ходе боевых действий при равных прочих воздействиях количество боевых единиц в каждой армии зависит от активности противника [17–18].

## V. МОДЕЛЬ ПРОТИВОСТОЯНИЯ МЕЖДУ РЕГУЛЯРНЫМИ И ПАРТИЗАНСКИМИ ЧАСТЯМИ

Как видим из графика, зависимость армий друг от друга только возрастает, что логично, поскольку в ходе боевых действий при равных прочих воздействиях количество боевых единиц в каждой армии зависит от активности противника.

Считается, что темп потерь партизан, проводящих свои операции в разных местах на некоторой известной территории, пропорционален не только численности армейских соединений  $N_1(t)$ , но и численности самих партизан  $N_2(t)$ , т.е. определяется членом вида  $\beta(t)N_1N_2$ . В результате модель становится нелинейной:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = -\alpha_1(t)N_1 - \beta_2(t)N_2 + \gamma_1(t), \\ \frac{dN_2}{dt} = -\alpha_2(t)N_2 - \beta_1(t)N_1N_2 + \gamma_2(t), \end{cases} \quad (8)$$

В (8) все величины имеют тот же смысл, что и в (1). Изучим модель (8) (модель Ланчестера) в частном случае:  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$ , (стороны не получают подкреплений

и как бы предоставлены самим себе)  $\alpha_1 = \text{const}$ ,  $\beta_1 = \text{const}$ ,  $\alpha_2 = \text{const}$ ,  $\beta_2 = \text{const}$ , (последнее означает, в частности, что у противников всегда найдется достаточное количество вооружений, которое может использоваться годными к несению службы бойцами).

Положим  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ . Другими словами, потери сторон определяются лишь действиями противника. Система (8) упрощается:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = \beta_2 N_2 \\ \frac{dN_2}{dt} = -\beta_1 N_1 N_2 \end{cases}, \quad (9)$$

Численности сторон, как и прежде, убывают со временем, но по другому закону. Умножим первое уравнение (9) на  $\beta_1 N_1$ , второе – на  $\beta_2$  и вычтем второе получившееся уравнение из первого. В итоге придем к уравнению

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\beta_1}{2} N_1^2(t) - \beta_2 N_2(t) \right] = 0$$

имеющему интеграл

$$\frac{\beta_1}{2} N_1^2(t) - \beta_2 N_2(t) = \frac{\beta_1}{2} N_1^2(0) - \beta_2 N_2(0) = C_1, \quad (10)$$

Изучим фазовые траектории системы (9) с помощью интеграла (10). Из рис. 2 видно, что при  $C_1 > 0$ , побеждает армия, при  $C_1 < 0$  партизаны, а при  $C_1 = 0$  победителя нет рис.4.

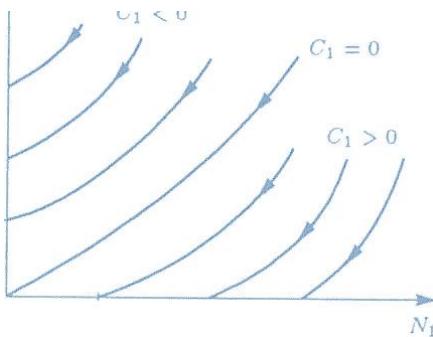


Рис. 4. Фазовые траектории системы

Так же, как и при действии регулярных частей, победа обеспечивается не только начальной численностью, но и боевой выучкой и качеством оружия. Пусть, например,  $C_1 > 0$ , т.е.

$$\frac{\beta_1}{2} N_1^2(0) > \beta_2 N_2(0). \quad (11)$$

Тогда партизанам необходимо обеспечить увеличение коэффициента  $\beta_2$  и повысить свою начальную численность  $N_2(0)$  на соответствующую величину, иначе они обречены на поражение. Причем это увеличение с ростом величины  $N_1(0)$  должно расти не линейно, а пропорционально второй степени  $N_1(0)$  (параболический закон боевых действий). Можно сказать, что в некотором смысле регулярные соединения находятся в более выгодном положении, поскольку неравенство (11) для них достигается при меньшем росте начальной численности, чем противоположное (11) неравенство для численности партизан. Исходя из такого математического описания, регулируя соответствующие коэффициенты, можно выбрать эффективную стратегию для нерегулярных частей войск [17–19].

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существует много типов моделей, описывающих динамику протекания вооруженных конфликтов. Они опираются на различные принципы и относятся к различным областям математического моделирования и алгоритмизации – теория игр, имитационное моделирование, генетические и роевые алгоритмы и т.д. Но для эффективного прогнозирования наиболее подходящими являются математические модели, в основе которых лежат дифференциальные уравнения. Наиболее известными моделями вооруженных конфликтов, основанных на дифференциальных уравнениях, являются ланчестерские модели.

В ходе исследования были рассмотрены основные виды ланчестерских моделей боевых действий и их особенности; описаны основные неизвестные, а также получение таких важных показателей моделей как боевая эффективность боевых единиц и коэффициент боевых потерь.

Построены и исследованы модификации ланчестерской модели для общего случая с вариацией преимуществ у противников, а также модели боевых действий двух регулярных армий. Коэффициенты в моделях принимались в виде безразмерных величин.

Показано, что зависимость армий друг от друга неуклонно растет в ходе боевых действий, независимо от того, на чьей стороне перевес сил.

В силу развития технологий ведения войн совершенствоваться должны и математические модели, описывающие их.

## ЛИТЕРАТУРА

- Медин, А. Имитационная система JTLS // Зарубежное военное обозрение. – 2010. – № 2. – С. 31-34; – № 3. – С. 26-31; № 4. – С. 35-37.
- Митюков, Н.В. Определение жертв войн через ланчестерские модели // Историческая психология и социология истории. Издательство: Издательство "Учитель" (Волгоград). Т. 2. Номер: 2. – 2009. – С. 122-140. – ISSN: 1994-6287. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15175214&>.
- Engel J. A Verification of Lanchester's Law // Operation Research. – 1954. – 2. – P. 163-171.
- Everson M. The Clash of Civilizations. Proposed Clash Combat System. – 2007. Available at: [http://home.akademie.de/~DToussaint/clash/clash\\_combat.htm](http://home.akademie.de/~DToussaint/clash/clash_combat.htm).
- Morse P., Kimball G. Method of Operations Research. – New York: John Wiley & Sons, 1950.
- Tam J.H. Application of Lanchester Combat Model in the Ardennes Campaign. Natural Resource Modeling. – 1998. – 11 (2). Available at: <http://rmmc.eas.asu.edu/abstracts/nrm/Vol11-2/hong/hong.html>.
- Строков А.А. История военного искусства. Т. 5. – СПб.: Полигон, 1994. – С. 662-664.
- Теменников Е. Урок истории // Техника молодежи. – 1988. – 10. – С. 28-30.
- Урланис Б.Ц. История военных потерь. – СПб.: Полигон, 1994. 291, 304, 478.
- Гонтарь Д.Н., Побегайло Е.Н. Применение математических методов в военно - прикладных аспектах // Актуальные проблемы теории, методологии и практики научной деятельности: Сборник статей Международной научно-практической конференции, Волгоград, 25 апреля 2021 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2021. – С. 12-14.
- Илев А.А. Основы теории Бойда. Направления развития, применения и реализации: монография. – М., 2008. В рукописи. – 64 с.

12. Кузнецов Д.В. Использование военной силы во внешней политике США: учеб. пособие. – Благовещенск: Изд-во БГПУ, 2010. – 430 с.
13. Осипов М. Дополнения к статье «Влияние численности сражающихся сторон на их потери» // Военный сборник. – 1915. – 10. – С. 93-96.
14. Митюков Н.В. Определение жертв войн через ланчестерские модели // Историческая психология и социология истории. – Волгоград: Изд-во "Учитель" – 2009. Т. 2. Номер: 2. – С. 122-140. – ISSN: 1994-6287. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15175214&>.
15. Митюков Н.В. 2007. Имитационное моделирование в военной истории. – М.: Изд-во ЛКИ.
16. Митюков Н.В. Математические модели и программные средства для реконструкции военно-исторических данных: автореф. ... д-ра тех. наук. – Ижевск, 2008.
17. Гонтарь Д.Н. Простейшая модель прогнозирования жертв в вооруженном конфликте // Инновационные механизмы решения проблем научного развития: Сборник статей Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции, Уфа, 22 апреля 2021 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС", 2021.
18. Гонтарь Д.Н., Побегайло Е.Н. Применение математических методов в военно - прикладных аспектах // Актуальные проблемы теории, методологии и практики научной деятельности: Сборник статей Международной научно-практической конференции, Волгоград, 25 апреля 2021 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2021. – С. 12-14.
19. Luck R.F. Evaluation of natural enemies for biolog. – 1990.

# Оптимизация конструкции модового разделителя СВЧ радиометрической системы на основе его электродинамического моделирования

**Федосеева Елена Валерьевна**

Муромский институт

Владимирский государственный

университет

Муром, Россия

*elenafedoseeva@yandex.ru*

**Ростокин Илья Николаевич**

Муромский институт

Владимирский государственный

университет

Муром, Россия

*rostokin.ilya@yandex.ru*

**Щукин Георгий Георгиевич**

Военно-космическая академия имени

А.Ф. Можайского

Санкт-Петербург, Россия

Муромский институт

Владимирский государственный

университет

Муром, Россия

*ggshchukin@mail.ru*

**Ростокина Елена Анатольевна**

Муромский институт

Владимирский государственный

университет

Муром, Россия

*arostokina@yandex.ru*

**Матюков Максим Андреевич**

Муромский институт

Владимирский государственный

университет

Муром, Россия

*maks.matyukov@mail.ru*

**Аннотация.** В данной работе представлены результаты пошаговой оптимизации модового разделителя СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых помех. Цель работы – оптимизация параметров модового разделителя антенны СВЧ радиометрической системы с компенсацией влияния фоновых помех путем программно реализуемого электродинамического моделирования в программном пакете «Microwave Studio». Задачи работы – анализ функционального назначения элементов модового разделителя и ограничений на вносимые корректировки их размеров; создание модели в программном пакете «Microwave Studio»; пошаговая корректировка размеров и расположения элементов модового разделителя с целью оптимизации S-параметров. Данные задачи были решены для трех частот 4 ГГц, 9,375 ГГц, 22 ГГц для возможности построения системы, осуществляющей прием радиотеплового излучения в трех частотных диапазонах.

**Abstract.** This paper presents the results of a step-by-step optimization of the mode separator of microwave radiometric system with compensation of the influence of background noise. The aim of the work is to optimize the parameters of the mode separator antenna of microwave radiometric system with compensation of the influence of background noise by software implemented electrodynamic simulation in the software package «Microwave Studio». The objectives of the work are to analyze the functional purpose of the elements of the mode separator and limitations on the adjustments made to their dimensions; to create a model in the software package «Microwave Studio»; step-by-step adjustment of the dimensions and location of the elements of the mode separator in order to optimize the S-parameters. These tasks were solved for three frequencies 4 GHz, 9,375 GHz, 22 GHz for the possibility of building a system that receives radiothermal radiation in the three frequency bands.

**Ключевые слова:** многочастотная СВЧ – радиометрическая система, дистанционное зондирование атмосферы, двухмодовый облучатель, электромагнитное моделирование.

**Keywords:** multi-frequency microwave - radiometric system, remote sensing of the atmosphere, two-mode irradiator, electromagnetic modeling.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00378, <https://rscf.ru/project/21-19-00378/>.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Электродинамическое моделирование СВЧ устройств имеет важное значение при решении задач оптимизации параметров радиотехнических систем, таких как коэффициентов передачи антенно-фидерного тракта, коэффициентов потерь входного сигнала, обусловленных рассогласованием элементов СВЧ тракта. Сложность решения задач оптимизации СВЧ устройств аналитическими методами связана с необходимостью решения волновых уравнений для электромагнитного поля в малых объемах направляющих структур при наличии вносимых пространственно распределенных неоднородностей, сложных конфигураций элементов СВЧ тракта, большого количества граничных задач. Поэтому одним из возможных вариантов оптимизации характеристик СВЧ устройств является их пошаговая оптимизация исходного варианта конструкции, определяемого его функциональным назначением в системе.

СВЧ радиометрические системы предназначены для зондирования окружающего пространства путем измерения мощности собственного радиотеплового излучения области исследования, что определяет малый уровень мощности входного сигнала системы и требование минимизации потерь в антенно-фидерном тракте. Особенностью их функционирования является одинаковый шумовой характер как информационного сигнала – входного сигнала антенны, обусловленного приемом радиотеплового излучения из угловой области главного лепестка диаграммы направленности антенны, так и помех, принимаемых антенной по области рассеяния диаграммы направленности антенны [1].

В качестве одного из вариантов решения задачи выделения информационного сигнала при микроволновом зондировании авторами предложен способ, основанный на формировании дополнительного сигнала на выходе антенны, который связан с использованием свойств множества

гомодового режима круглого волновода облучателя антенны и получением дополнительной диаграммы направленности на той же апертуре зеркала, но с отсутствием приема по осевому направлению антенны [2].

## II. КОНСТРУКЦИЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МОДОВОГО РАЗДЕЛИТЕЛЯ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Модовый разделитель облучателя антенны СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых помех должен обеспечить возможность распространения двух первых мод круглого волновода  $H_{11}$  и  $E_{01}$ . На моде  $H_{11}$  формируется входной информационный сигнал, а на моде  $E_{01}$  - сигнал компенсации. Также должно быть выполнено разделение мод по соответствующим выходным каналам, что оказывается возможным при установке кольца, выполняющего функции режекторного фильтра для моды  $H_{11}$  и прохождение моды  $E_{01}$ . Выходы антенны для информационного канала и канала формирования сигнала компенсации реализуются присоединением к круглому волноводу прямоугольных волноводов, что связано с трансформацией волн  $H_{11}$  и  $E_{01}$  круглого волновода в основную волну прямоугольного волновода  $H_{10}$  [2].

Конструкция модового разделителя с функциональным назначением каждого элемента представлена на рис. 1.

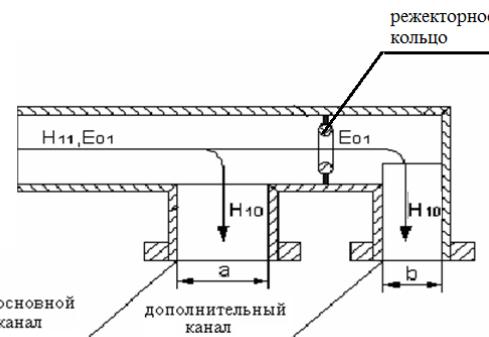


Рис. 1. Конструкция модового разделителя антенны СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых помех

Радиус круглого волновода должен быть выбран из условия двухмодового режима работы, необходимо обеспечить выполнение неравенства (1)

$$\lambda_{kpH21} < \lambda < \lambda_{kpH11}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – рабочая длина волны в свободном пространстве;  $\lambda_{kpH21}$  и  $\lambda_{kpH11}$  – критические длины волн мод круглого волновода  $H_{21}$  и  $H_{11}$ , соответственно.

Исходя из неравенства (1), ограничения на радиус волновода модового разделителя задаются следующим выражением

$$\lambda/3,41 < R < \lambda/2,06 \quad (2)$$

Согласно выражению (2) радиус волновода модового разделителя должен быть в следующих пределах: для частоты 4 ГГц – от 22 мм до 36.5 мм; для частоты 9.375 ГГц – от 8.8 мм до 14.5 мм; для частоты 1.35 – от 3.96 мм до 6.55 мм.

Таким образом, есть принципиальная возможность изменения радиуса волновода модового разделителя в указанных пределах для каждой указанной частоты.

Диаметр режекторного кольца выбирается из условия не прохождения моды  $H_{11}$  и должен отвечать условию

$$0,29 < \frac{d}{\lambda} < 0,38 \quad (3)$$

Согласно выражению (3) диаметр режекторного кольца должен иметь значение в следующих пределах: для частоты 4 ГГц – от 21.8 мм до 28.5 мм; для частоты 9.375 ГГц – от 8.7 мм до 11.4 мм; для частоты 1.35 – от 3.9 мм до 5.1 мм.

Размеры поперечных сечений прямоугольных волноводов считаются фиксированными и заданы стандартом: для частоты 4 ГГц – 72x34 мм; для частоты 9.375 ГГц – 23x10 мм; для частоты 1.35 – 11x5.5 мм.

## III. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ МОДОВОГО РАЗДЕЛИТЕЛЯ АНТЕННЫ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Модели модового разделителя на все указанные три диапазона были созданы в программе «Microwave Studio». Пример модели на диапазон 4 ГГц приведен на рис. 2.

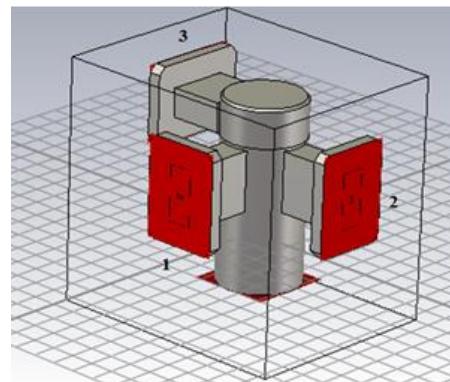


Рис. 2. Модель модового разделителя антенны с центральной рабочей частотой 3,5 ГГц: 1 – основной канал приема на вертикальной поляризации; 2 – основной канал приема на горизонтальной поляризации; 3 – дополнительный канал формирования сигнала компенсации помех

Для возможности приема радиотеплового излучения в СВЧ радиометрической системе на двух линейных поляризациях – горизонтальной и вертикальной в модовом разделителе выполнены два выхода для основных каналов, расположенных в взаимно перпендикулярных плоскостях.

Были созданы модели модовых разделителей, выполненных на круглых волноводах стандартных размеров диаметром 72 мм (для 4 ГГц), 30 мм (для 9.375 ГГц), 13 мм (22 ГГц).

Возможность оптимизации характеристик модовых разделителей определяется наличием элементов, размеры которых предусматривают диапазон возможных значений, такие как радиус волновода, радиус режекторного кольца, расстояние места включения прямоугольных волноводов от режекторного кольца [3].

Оптимизация конструкции модового разделителя была направлена на получение максимального коэффициента передачи основных каналов при допустимом значении потерь моды  $E_{01}$ , что контролировалось по частотным зависимостям соответствующих S параметров модели.

Пошаговое изменение размеров радиуса волновода и адаптивного изменения радиуса кольца в первую очередь было направлено на снижение коэффициента прохождения моды  $H_{11}$  область режекторного кольца, т.е. повышения его свойств изоляции для указанной моды. При достижении максимально возможной изоляции решалась задача оптимизации расположения входов прямоугольного волновода и контролировалось вносимые изменения в распределение поля моды  $H_{11}$  в круглом волноводе. Основное требование к расположению прямоугольных отверстий – входов прямоугольных волноводов – это соответствие центра отверстий максимуму распределения поля волны  $H_{11}$  в круглом волноводе, поэтому строго фиксировались изменения распределения поля при внесении каждой неоднородности в круглый волновод модового разделителя. Для получения максимального коэффициента передачи мощности моды  $H_{11}$  из круглого волновода в прямоугольный волновод основного приемного канала было выбрано сечение ближайшего к режекторному кольцу максимума распределения поля [4].

Наличие нескольких элементов в составе модового разделителя, вносящих неоднородности в круглый волновод, определило последовательный порядок выполнения оптимизации путем пошагового добавления элементов и оптимизацию конструкции на каждом таком этапе.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ МОДОВОГО РАЗДЕЛИТЕЛЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В данном разделе приведем результаты оптимизации конструкции модового разделителя антенны СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов в сравнении с исходным вариантом, построенным на основе круглого волновода стандартного сечения и с включением прямоугольного волновода по максимуму получаемой на его выходе мощности, зафиксированной при экспериментальном исследовании путем продольного его перемещения.

На рис. 3 при приведены частотные зависимости S параметров исходного и оптимизированного модового разделителя, работающего в полосе частот с центральной частотой 4 ГГц. На рис. 3, а частотная зависимость S параметра, задающего коэффициент передачи для основного канала, т.е. для моды  $H_{11}$  круглого волновода, а на рис. 3, б – коэффициента передачи для дополнительного канала, т.е. для моды  $E_{01}$ . Полученные зависимости показывают, что выполненная оптимизация конструкции позволяет сократить потери сигнала, т.к. коэффициент для обоих каналов увеличился на 7 дБ.

Аналогичное моделирование было выполнено и для модовых разделителей, работающих в полосе частот с центральной частотой 9.375 ГГц и 22 ГГц.

При оптимизации конструкции модового разделителя оптимальным вариантом с точки зрения получения максимального коэффициента передачи по основным каналам оказался переход на круглый волновод нестандартного сечения. Для частоты 4 ГГц наилучшие результаты были получены для волновода с диаметром 62.7 мм, для частоты 9.375 ГГц – 25.3 мм, для частоты 22 ГГц – 10.35 мм.

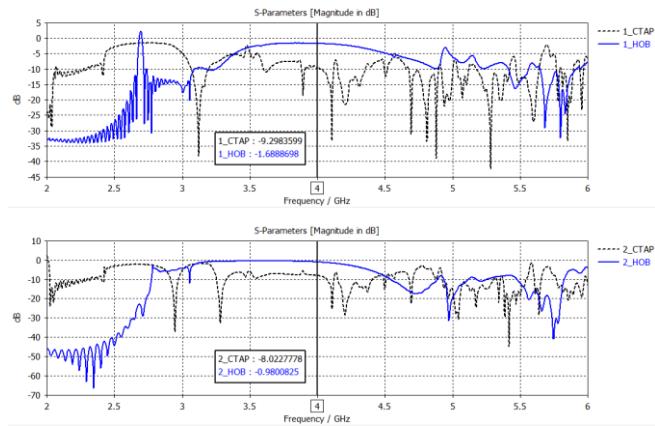


Рис. 3. Частотные зависимости S параметров модовых разделителей, полученные в программе «Microwave Studio»

Обобщенные результаты моделирования модовых разделителей для трех частот – 4 ГГц, 9.375 ГГц и 22 ГГц приведены в табл. 1

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Центральная частота, ГГц		Коэффициент передачи модового разделителя, дБ					
		Основной канал вертикальной поляризации	Основной канал горизонтальной поляризации	Дополнительный канал			
4 ГГц	3.6	-9.55	-0.48	-8.14	-2.27	-4.79	-1.02
	4	-9.3	-0.98	-8.02	-1.69	-2.32	-1.11
	4.4	-9.05	-5.52	-10.5	-3.73	-3.73	-0.4
9.375 ГГц	9	-5.22	-0.48	-3.45	-1.48	-0.5	-2.05
	9.4	-5.8	-0.4	-5.06	-1.39	-0.58	-1.12
	9.8	-7.02	-0.38	-9.18	-1.2	-0.45	-1.72
22 ГГц	21.8	21.8	-7.45	-1.47	-6.7	-0.44	-0.45
	22	22	-6.01	-1.23	-8.68	-0.41	-0.59
	22.6	22.6	-10.2	-1.16	-12.5	-0.4	-2.32

Приведенные в таблице данные свидетельствуют об улучшении характеристик модового разделителя не только на основной частоте, но и в полосе частот, что важно для СВЧ радиометрической системы, в которой ширина полосы частот определяет в конечном счете чувствительность системы.

#### V. ПЕРСПЕКТИВЫ И ЗАДАЧИ

Результаты моделирования модовых разделителей антенны СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов в первую очередь позволяют сделать вывод о необходимости изменения размеров конструкции этого устройства в соответствии с полученными данными, что позволит повысить чувствительность системы и получить более точное значение сигнала после компенсации фоновых шумов.

Переход к приему на общую апертуру зеркала антенны СВЧ радиометрической системы, работающей в трех указанных ранее диапазонах определяет следующую задачу – моделирование и оптимизация модового разделителя облучателя зеркальной антенны с последовательным выделением сигналов во всех частотных диапазонах в единой конструкции. При этом дополнительно возникает задача оптимизации по взаимным потерям трех час-

тотных диапазонов и задача минимизации взаимного влияния каждой из трех составных частей модового разделителя.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты моделирования и оптимизации модового разделителя позволяют существенно снизить потери входных сигналов СВЧ радиометрической системы. Это позволяет спрогнозировать увеличение ее чувствительности при условии точного соблюдения размеров оптимизированной конструкции модового разделителя при его изготовлении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. – Л.:Гидрометеиздат, 1987. – 283 с.
2. Патент на изобретение №2300831 Способ снижения уровня шума антенны и двухмодовая апертурная антенна / Федосеева Е.В., Ростокина Е.А., Ростокин И.Н. Опубл.: 10.06.2007 Бюл. №16.
3. Патент на полезную модель №98820. Радиометрическая система с компенсацией внешних помех и нестабильности коэффициента передачи системы / Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Ечин П.А. Опубл.: 27.10.2010 Бюл. №30.
4. Патент на полезную модель №122185. Модуляционный радиометр двухканальной радиометрической системы с программно-аппаратным модулем / Федосеева Е.В., Ечин П.А., Ростокин И.Н., Молотков А.А., Федосеев А.А. Опубл.: 20.11.2012 Бюл. №32.

# Математическое моделирование распространения планктона под влиянием его генотипа

Ляпунова Ирина Артуровна

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*ialyapunova@sfedu.ru*

Таран Алексей Евгеньевич

Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*ataran@sfedu.ru*

**Аннотация.** Авторами данной работы предлагается моделирование распространения фитопланктона относительно мутационной изменчивости к освещению водной поверхности с помощью частотных моделей, т.к. для фитопланктона давление отбора на генотип зависит в основном от самого генотипа. В рамках исследования были проанализированы современные подходы и модели популяционной генетики, которые можно было бы применить к моделям типа «фито-зоопланктон». Разработана и численно исследована демо-генетическая модель типа «хищник-жертва» для зоо- и фитопланктона.

**Abstract.** The author of this work is the modeling of phytoplankton with respect to mutational variability in the American water surface using frequency models, since for phytoplankton, determining the pressure on the genotype depends mainly on the genotype itself. As part of the study, modern approaches and models of population genetics were analyzed, which could be applied to the template of the "phytozooplankton" type. A demo-genetic model of the "predator-prey" type for zoo- and phytoplankton has been developed and numerically studied.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, генотип, фитопланктон, зоопланктон, популяционная генетика, частотные модели.

**Keywords:** mathematical modeling, genotype, phytoplankton, zooplankton, population genetics, frequency models.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, фитопланктон составляет около 80% органического вещества всей планеты и играет большую роль в экологической жизни и балансе её экосистемы. Основная функция фитопланктона - поддержание жизни и остальных взаимосвязей пищевой цепи. Он является одним из основных источников первичной продукции экосистемы и основанием трофической пирамиды водоёма, главным ее звеном. Именно фитопланктон определяет первичную продукцию водоёмов, а также и качество их вод.

Разнообразие видов фитопланктона в мировом океане чрезвычайно велико – десятки тысяч видов. В одном миллилитре воды можно обнаружить сотни и тысячи видов. В Азовском море их около трехсот. В Таганрог-

ском заливе их около 100 (два основных вида составляют около 90% биомассы всех водорослей залива (диатомовые и сине-зеленые)). Плотность фитопланктона в Азовском море 5-10 гр/м<sup>3</sup>. За год здесь производится 400 млн.т. фитомассы. (100 тонн на гектар) - больше, чем на любом, самом плодородном поле. В наиболее продуктивной части Азовского моря (Таганрогском заливе) "урожайность" в 1,5 раз выше. Органическое вещество – основа жизни. В последние годы рыбопродуктивность Азовского моря и Таганрогского залива снижена: бурный отлов, плотины (на Дону и Кубани) перерезали ве-ковые тропы осетровых к местам нереста, регулирование речного стока нарушило многовековой речной режим.

Несмотря на многолетние исследования в данной области, моделирование динамики популяций фито- и зоопланктона остается актуальным. На сегодняшний день построено и исследовано множество математических моделей, описывающих круговорот биогенных веществ, производство органического вещества и динамику фитопланктона популяций. Отметим, что характером протекания этих процессов определяется общее «здравье» экосистемы водоёма. Интенсивность этих процессов служит основой для классификации водоемов. Одним из малоизученных факторов, влияющих на увеличение или уменьшение популяции планктона, является влияние его генотипа.

Одной из первых и важнейших задач математической популяционной генетики был количественный анализ результатов действия естественного отбора в mendelевской изолированной популяции.

На сегодняшний день сформировалось довольно четкое представление о плотностно- и частотнозависимых составляющих в естественном отборе. Учеными выявлено, что в популяциях коэффициенты отбора генотипических групп являются функциями частот каких-либо генов или генотипов или плотности популяции [2, 3].

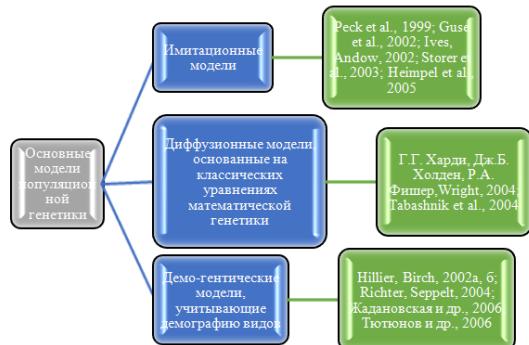
Несмотря на широкое разнообразие математических моделей, долгосрочное прогнозирование динамики популяций фито- и зоопланктона вызывает трудности. В современных моделях динамику распространения планктона рассматривают относительно химико-биоло-

гического состава и гидрофизических характеристик среды, а также известно, что увеличение биомассы живых организмов прямо пропорционально увеличению кормовой базы. Для планктонных сообществ наблюдается и тесная связь с освещенностью поверхности воды. Однако немаловажную роль играет приспособляемость организмов к внешним условиям, в том числе из-за многолетних мутаций. Если изменения химико-биологического состава воды можно спрогнозировать относительно течений и влияния человека на среду, то природные изменения освещенности поверхности воды учесть тяжелее, т.к. связаны с изменениями глобального климата. При этом логично, что планктон может адаптироваться и к этим изменениям. При моделировании такой адаптации может использоваться демо-генетический подход [4], а также частотные модели распределения генов.

Авторами данной работы предлагается моделирование распространения фитопланктона относительно мутационной изменчивости к освещению водной поверхности с помощью частотных моделей, т.к. для фитопланктона давление отбора на генотип зависит в основном от самого генотипа.

## II. ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ ПОПУЛЯЦИОННОЙ ГЕНЕТИКИ

На сегодняшний день существуют три основных типа модельных подходов в популяционной генетике, как видно на рис. 1: имитационные модели; диффузионные модели, основанные на классических уравнениях математической генетики; демо-генетические диффузионные модели, которые учитывают демографию изучаемых видов [4].



Имитационные модели конкретных сложных живых систем, учитывают всю имеющуюся информацию об объекте. Цель построения таких моделей – детальное прогнозирование поведения сложных систем или решение оптимизационной задачи их эксплуатации.

Диффузионные модели, разработанные на основе классических уравнений математической генетики, показывают пространственно-временное распределение генотипов в популяции. Разработанная Ю.М. Свирежевым теория оптимальных процессов эксплуатации [5] популяций и сообществ позволяет находить оптимальные стратегии "сбора урожая" для популяций и сообществ с помощью построенных для них математических моделей. Обширные исследования динамических свойств системы "хищник-жертва" – позволили получить ряд новых важных результатов.

Демо-генетические диффузионные модели, учитывающие демографию изучаемых видов, позволяют достаточно эффективно исследовать поведение и динамику численности конкретного генотипа хищника под воздействием трансгенного растения.

Предлагаются новые модельные подходы к эволюции Bt-устойчивости в популяциях насекомых-хищников, объясняющие пятнистость распределения видов в пространстве не только учетом диффузии, но также и эффектами взаимодействия и запаздывания в популяциях.

## III. ДЕМО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ «ФИТО-ЗООПЛАНКТОН»

Известно, что вертикальное и горизонтальное пространственное распределение планктона в водной среде отличается высокой неоднородностью. Пятнистость ("пэтчинг") распределения планктона в океанах, морях, больших и малых озерах обнаруживается в очень широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Практически все современные исследования неоднородного распределения планктона относятся к большим водным системам: океанам, морям, крупным озерам и водохранилищам. Данные наблюдений свидетельствуют о том, что на пространственных масштабах от десяти километров и более пятнистость планкtonного распределения определяется в основном неоднородностью соответствующих физико-химических полей (Malchow et al., 2002). Для фитопланктона часто можно установить прямое соответствие между неоднородностью его распределения и физическими (абиотическими) факторами среды как по вертикали (явления в термоклине, конвективный перенос, апвеллинг) (Fennel, 1999), так и по горизонтали (воздействие ветра, фронты и синоптические вихри) (Webster, 1990; Verhagen, 1994; Webster, Hutchinson, 1994; Kimura et al., 1997; Fennel, 2001).

Причины пространственной неоднородности и изменчивости зоопланктона менее ясны, поскольку они способны самостоятельно совершать достаточно значительные вертикальные и горизонтальные перемещения, а не только пассивно переноситься движением воды. На масштабах менее 100 метров определяющим является влияние турбулентного обмена. Следует иметь в виду, что большие амплитуды изменчивости планктона на мезомасштабе (1–100 км) часто наблюдаются и в отсутствие значительных физических воздействий на него. В этих случаях уже трудно найти простое соответствие между пространственными распределениями температуры, хлорофилла и биомассой планктона, хотя иногда удается установить слабые отрицательные корреляции между фито- и зоопланктом (Mackas, Boyd, 1979; Steele, Henderson, 1979). Самым сложным является промежуточный диапазон от 100 метров до 10 км, где нет однозначной зависимости между пятнистостью и каким-то одним определяющим фактором. В пределах этого диапазона зависимость, как правило, многофакторная и при прочих равных условиях с примерно одинаковым вкладом каждого из факторов. Можно также говорить о том, что, по всей видимости, превалирующим здесь является биологический, а не гидродинамический механизм формирования пятнистости планктона (Malchow et al., 2002). При относительно однородных внешних физических условиях важно рассмотреть, действительно ли пятнистость распределения представляет собой следствие экологических процессов, а не просто чисто внешних воздействий на систему.

Термин "пятнистость" обычно используется для описания изменчивости на горизонтальных масштабах от 10 м до 100 км и на вертикальных масштабах от 0,1 м до 50 м. С этими диапазонами связывают несколько физических режимов (Bennett, Denman, 1985; Abraham, 1998). Примерно между 1 мм и 0,1 м (этот диапазон меньше того диапазона, где мы без труда можем обнаружить изменчивость концентрации организмов) движение жидкости можно считать изотропным. Сглаживание возникающих пространственных градиентов за счет молекулярной диффузии и вязкости происходит достаточно быстро и эффективно. Эту область спектра изменчивости называют вязким поддиапазоном или диапазоном диссипации кинетической энергии в тепло. На несколько больших масштабах, примерно от 0,1 м до 1 м (эту область называют диапазоном равновесия или инерционным диапазоном), – флуктуации скорости продолжают оставаться изотропными. В теории течений считается, что в пределах этого спектрального диапазона приток или отток кинетической энергии достаточно незначителен. Энергия переносится взаимодействующими турбулентными вихрями на более мелкие масштабы, где она фактически диссирирует. На масштабах больше нескольких метров (диапазон плавучести), флуктуации вертикальной скорости в значительной степени подавляются за счет устойчивой стратификации плотности, а турбулентные и периодические движения становятся все в большей степени горизонтальными. Наименьший предел для этого диапазона устанавливается в соответствии со степенью стратификации и измеряется с помощью частоты плавучести (частоты Брента-Вайсяля) и масштаба длины Озмидова. Там, где вертикальные градиенты плотности в верхнем слое незначительны, флуктуации скорости могут быть практически изотропными во всем перемешанном слое (до 10 м и даже более).

Турбулентный перенос оказывает основное влияние на образование пятен планктона и именно его рассматривают как один из важных источников биологической изменчивости. В первоначальной KISS-модели (Kierstead – Slobodkin – Skellam) (Skellam, 1951; Kierstead, Slobodkin, 1953; Okubo, 1980) было показано, что локализованное цветение популяции, имеющей высокую скорость роста, будет иметь место только в том случае, если пространственные масштабы этого образования достаточно велики для того, чтобы рост популяции превышал ее рассеяние из пятна вследствие процессов адвекции и турбулентности. KISS-модель параметризует процесс турбулентного перемешивания введением коэффициента турбулентного обмена. При этом не учитывается мелкомасштабная изменчивость в турбулентном каскаде. Другие модели (Denman, Platt, 1976; Denman et al., 1977; Wilson et al., 1979) пытаются избежать этого ограничения с помощью предсказания формы спектра фитопланктонной изменчивости. Подобно KISS-модели, в них определяется характеристический масштаб длины, на котором рост популяции планктона становится настолько же важен, как и процесс турбулентного разрушения пятна. Следует отметить еще и тот факт, что все указанные модели основаны на предположении об изотропности турбулентности (которое для океанских условий не выполняется уже на масштабах, больших нескольких метров) и используют одинаковую скорость роста популяции в лю-

бой точке пространства. Между тем, имеются данные наблюдений, показывающие, что удельные скорости роста природных популяций фитопланктона и веслоногих ракообразных имеют вполне определенную собственную пространственно-временную структуру, хотя у популяции зоопланктона размах изменчивости несколько меньше (Therriault et al., 1978; Kimmerer, 1983).

Еще одним возможным источником возникновения пространственных неоднородностей являются чисто биологические взаимодействия между трофическими уровнями или конкурентные отношения между видами, которые обычно моделируются системами нелинейных дифференциальных или разностных уравнений. Включение в такого рода системы диффузии (в некоторых моделях и адвекции) может приводить к неустойчивости и образованию в конечном итоге пространственно-временных неоднородностей. В ряде случаев образование зон повышенной концентрации биогенных веществ, планктона, рыб может быть связано с процессами апвеллинга или вертикального перемешивания, с образованием фронтальных зон, вихревых образований различной физической природы, приливами (Kimura et al., 1997; Fennel, 1999; Fennel, 2001).

Итак, вертикальное распределение планктона в водоемах и изменение его в течение года зависят от многих факторов, которые можно разделить на две группы – механические и биотические. Первые действуют одинаковым образом и на живые и на мертвые компоненты сестона, и их эффект зависит только от физических свойств плавающих частиц. Вторые действуют только на живые организмы и притом по-разному в зависимости от особенностей биологии каждого из них. Обе эти группы факторов действуют одновременно, и картина вертикального распределения планктона представляет собою результат взаимодействия факторов механических и биотических. Однако во многих случаях из этого комплекса факторов можно выделить такой, который по своему значению доминирует над другими и преимущественно определяет характер картины распределения. Эта возможность, разумеется, возрастает с количеством имеющихся для отдельных видов наблюдений.

Автором исследования были проведены наблюдения динамики планктона по данным различным спутников, которые показали, что при незначительном воздействии механических факторов (вертикальные циркуляции (конвекционные токи) полные и частичные, обусловленные изменением плотности воды в связи с изменением ее температуры, ветровые перемешивания, турбулентные движения воды, течения, сейши, приток и сток в проточных водоемах и др.) распространение зоопланктона осуществляется в направлении роста биомассы фитопланктона – кормовой базы. Представив плотность хищников-зоопланктона в виде суммы видов с различными генотипами – с доминантными, рецессивными и смешанными признаками, можно построить модель «фито-зоопланктон» с учетом генотипа последних. Такая модель позволит прогнозировать плотность популяции планктона с учетом экологического влияния на среду и скорость мутации видов.

## IV. РАЗРАБОТКА ДВУХУРОВНЕВОЙ ДЕМО-ГЕНЕТИЧСКОЙ МОДЕЛИ «ФИТО-ЗООПЛАНКТОН»

Пусть  $R=R(x,y,t)$  – прирост биомассы исследуемого вида фитопланктона - осуществляется согласно логистическому закону,  $N_{ij} = N_{ij}(x, y, t)$  плотность генотипа  $ij$  в точке  $(x, y) \in \Omega$  в момент времени  $t$  ( $i, j = r$  или  $s$ ),  $N_{ss}$ ,  $N_{rs}$ ,  $N_{rr}$  – плотности соответствующих генотипов хищников - зоопланктона.

$$N = N_{ss} + N_{rs} + N_{rr}. \quad (1)$$

- общая плотность популяции зоопланктона.

Предположим, что ускорение перемещения зоопланктона пропорционально градиенту плотности фитопланктона или изменению прироста их биомассы:

$$\frac{dv_{ij}}{dt} = k\nabla R + \delta_v \Delta v_{ij}, \quad (2)$$

где  $R(x, y, t)$  – прирост биомассы популяции растительного ресурса в точке  $(x, y)$  в момент времени  $t$ ;  $v_{ij}(x, y, t)$  – скорость перемещения хищников по пространственным переменным  $x$  и  $y$ ,  $\delta_v$  – коэффициент поисковой активности.

Границы местообитания сообщества предполагаются необитаемыми, что соответствует, например, водохранилищу, то есть как диффузионные, так и advективные потоки особей через границы отсутствуют:

$$\nabla N_{ij} \cdot n = 0, \nabla v_{ij} \cdot n = 0, x, y \in \partial\Omega. \quad (3)$$

Такая постановка граничных условий допускает естественную экологическую интерпретацию, а именно пространственную изолированность трофического сообщества [38–40].

Получаем следующую начально-краевую задачу для системы уравнений типа конвекции-диффузии реакции, описывающую данную модель.

$$\begin{cases} \frac{dR}{dt} = r_R R \left(1 - \frac{R}{K_R}\right) - aRN + \delta_R \Delta R, \\ \frac{dN_{ij}}{dt} = eaR f_{ij} - \mu N_{ij} - \nabla(N_{ij} v_{ij}) + \delta_N \Delta N_{ij}, \\ \frac{dv_{ij}}{dt} = k\nabla R + \delta_v \Delta v_{ij}, \\ N_{ij}(x_0, y_0, 0) = N_{ij}^*, \\ R(x_0, y_0, 0) = R^*, \\ \nabla N_{ij} \cdot n = 0, \nabla v_{ij} \cdot n = 0, x, y \in \partial\Omega. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $\nabla$  – оператор градиента,  $e$  – коэффициент эффективности хищника; полагаем, что смертность и конкуренция не зависят от генотипа:  $\delta_{ij} = \delta_N$ ,  $\mu_{ij} = \mu$ ;

$$K_R = (b - \mu)/\alpha \quad (5)$$

- емкость среды,  $\delta_R$ ,  $\delta_N$  – коэффициенты диффузии растительного ресурса и хищника,  $k$  – коэффициент эффективности хищника,  $\mu$  – коэффициент смертности генотипов;  $n$  – внешняя нормаль к границе  $\partial\Omega$ ,  $\Omega$  – ареал хищника;  $f_{ij}$  определяют пропорции распределения потомства хищника по трем рассматриваемым генотипам:

$$\begin{aligned} f_{ss}(N_{ss}, N_{sr}, N_{rr}) &= W_{ss} \frac{1}{N} \left( N_{ss} + \frac{N_{rs}}{2} \right)^2, \\ f_{sr}(N_{ss}, N_{sr}, N_{rr}) &= W_{rs} \frac{2}{N} \left( N_{ss} + \frac{N_{rs}}{2} \right) \left( \frac{N_{rs}}{2} + N_{rr} \right), \\ f_{rr}(N_{ss}, N_{rs}, N_{rr}) &= W_{rr} \frac{1}{N} \left( \frac{N_{rs}}{2} + N_{rr} \right)^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Модели типа (4) исследованы в ряде работ (Говорухин и др., 2000; Тютюнов и др.; 2001) [9], [10]. Показано, что в двумерном случае высокие значения поисковой активности генерируют пространственную неоднородность распределения популяции.

Мы получили систему уравнений в частных производных типа реакция-адвекция-диффузия. С увеличением коэффициента поисковой активности к амплитуды колебаний численности популяции монотонно возрастают [7].

## V. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМО-ГЕНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АДАПТАЦИИ ЗООПЛАНКТОНА К ИЗМЕНЕНИЮ КОРМОВОЙ БАЗЫ

Часто в прикладных задачах, например, при численном решении задач гидродинамики, тепломассопереноса, геофильтрации, динамики популяций и других процессов возникает необходимость решения уравнения конвекции-диффузии [66]. В случае использования неявных схем такие задачи приводят к сеточным уравнениям с несамосопряженным оператором.

Для исследования двумерной демо-генетической модели динамики зоопланктона используем решение сеточных уравнений аддитивным попеременно-треугольным методом, при котором равномерная норма вектора невязки убывает достаточно быстро.

Построение дискретной модели адаптации вредителей к изменению кормовой базы. Дискретные аналоги операторов конвективного и диффузионного переноса в случае граничных условий в форме Неймана могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} (q_0)_{i,j} u c'_x &\equiv (q_1)_{i,j} u_{i+1/2,j} \frac{c_{i+1,j} - c_{i,j}}{2h_x} + (q_2)_{i,j} u_{i-1/2,j} \frac{c_{i,j} - c_{i-1,j}}{2h_x}, \\ (q_0)_{i,j} (\delta c'_x)'_x &\equiv (q_1)_{i,j} \delta_{i+1/2,j} \frac{c_{i+1,j} - c_{i,j}}{h_x^2} - (q_2)_{i,j} \delta_{i-1/2,j} \frac{c_{i,j} - c_{i-1,j}}{h_x^2} \end{aligned} \quad (7)$$

где  $q_m$  – коэффициенты заполненности контрольных областей,  $h_x$ ,  $h_y$ ,  $\tau$  – шаг сетки по пространственным переменным  $x$  и  $y$  и времени  $t$ .

Аппроксимация уравнения (7) для динамики растительного ресурса в случае граничных условий в форме Неймана имеет вид:

$$\begin{aligned} (q_0)_{i,j} \frac{\hat{R}_{i,j} - R_{i,j}}{\tau} &= (q_1)_{i,j} (\delta_R)_{i+1/2,j} \frac{\bar{R}_{i+1,j} - \bar{R}_{i,j}}{h_x^2} - \\ &- (q_2)_{i,j} (\delta_R)_{i-1/2,j} \frac{\bar{R}_{i,j} - \bar{R}_{i-1,j}}{h_x^2} + (q_3)_{i,j} (\delta_R)_{i,j+1/2} \frac{\bar{R}_{i,j+1} - \bar{R}_{i,j}}{h_y^2} - \\ &- (q_4)_{i,j} (\delta_R)_{i,j-1/2} \frac{\bar{R}_{i,j} - \bar{R}_{i,j-1}}{h_y^2} + (q_0)_{i,j} (r_R (R_0 - R_{i,j}) \bar{R}_{i,j} - \beta N_{i,j}), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\hat{R}$  – значение концентрации жертв на следующем временном слое,  $R$  – значение концентрации жертв на текущем временном слое,  $\bar{R}_{i,j} = \sigma \hat{R}_{i,j} + (1 - \sigma) R_{i,j}$ ,  $\sigma \in [0, 1]$ .

Дискретный аналог уравнения (8) примет вид:

$$\begin{aligned} & \left(q_0\right)_{i,j} \frac{\bar{N}_{i,j} - N_{i,j}}{\tau} + \left(q_1\right)_{i,j} u_{i+1/2,j} \frac{\bar{N}_{i+1,j} - \bar{N}_{i,j}}{2h_x} + \\ & + \left(q_2\right)_{i,j} u_{i-1/2,j} \frac{\bar{N}_{i,j} - \bar{N}_{i-1,j}}{2h_x} + \left(q_3\right)_{i,j} v_{i,j+1/2} \frac{\bar{N}_{i,j+1} - \bar{N}_{i,j}}{2h_y} + \\ & + \left(q_4\right)_{i,j} v_{i,j-1/2} \frac{\bar{N}_{i,j} - \bar{N}_{i,j-1}}{2h_y} = \left(q_1\right)_{i,j} \left(\delta_v\right)_{i+1/2,j} \frac{\bar{N}_{i+1,j} - \bar{N}_{i,j}}{h_x^2} - \\ & - \left(q_2\right)_{i,j} \left(\delta_v\right)_{i-1/2,j} \frac{\bar{N}_{i,j} - \bar{N}_{i-1,j}}{h_x^2} + \left(q_3\right)_{i,j} \left(\delta_v\right)_{i,j+1/2} \frac{\bar{N}_{i,j+1} - \bar{N}_{i,j}}{h_y^2} - \\ & - \left(q_4\right)_{i,j} \left(\delta_v\right)_{i,j-1/2} \frac{\bar{N}_{i,j} - \bar{N}_{i,j-1}}{h_y^2} + \left(q_0\right)_{i,j} f_{i,j}. \end{aligned} \quad (9)$$

Запишем аппроксимацию уравнений для расчета скорости движения вредителей, находящихся в пассивном состоянии в случае граничных условиях первого рода:

- для компоненты  $\mathcal{U}$ :

$$\begin{aligned} & \bar{u}_{i,j} + \alpha \left( \frac{\hat{u}_{i,j} - u_{i,j}}{\tau} + u_{i+1/2,j} \frac{\bar{u}_{i+1,j} - \bar{u}_{i,j}}{2h_x} + u_{i-1/2,j} \frac{\bar{u}_{i,j} - \bar{u}_{i-1,j}}{2h_x} + \right. \\ & \left. + v_{i,j+1/2} \frac{\bar{u}_{i,j+1} - \bar{u}_{i,j}}{2h_y} + v_{i,j-1/2} \frac{\bar{u}_{i,j} - \bar{u}_{i,j-1}}{2h_y} \right) = \left(\delta_v^{(1)}\right)_{i+1/2,j} \frac{\bar{u}_{i+1,j} - \bar{u}_{i,j}}{h_x^2} - \\ & - \left(\delta_v^{(1)}\right)_{i-1/2,j} \frac{\bar{u}_{i,j} - \bar{u}_{i-1,j}}{h_x^2} + \left(\delta_v^{(1)}\right)_{i,j+1/2} \frac{\bar{u}_{i,j+1} - \bar{u}_{i,j}}{h_y^2} - \\ & - \left(\delta_v^{(1)}\right)_{i,j-1/2} \frac{\bar{u}_{i,j} - \bar{u}_{i,j-1}}{h_y^2} + k^{(1)} \frac{R_{i+1,j} - R_{i-1,j}}{2h_x}; \end{aligned} \quad (10)$$

- для компоненты  $\mathcal{V}$ :

$$\begin{aligned} & \bar{v}_{i,j} + \alpha \left( \frac{\hat{v}_{i,j} - v_{i,j}}{\tau} + u_{i+1/2,j} \frac{\bar{v}_{i+1,j} - \bar{v}_{i,j}}{2h_x} + u_{i-1/2,j} \frac{\bar{v}_{i,j} - \bar{v}_{i-1,j}}{2h_x} + \right. \\ & \left. + v_{i,j+1/2} \frac{\bar{v}_{i,j+1} - \bar{v}_{i,j}}{2h_y} + v_{i,j-1/2} \frac{\bar{v}_{i,j} - \bar{v}_{i,j-1}}{2h_y} \right) = \left(\delta_v^{(1)}\right)_{i+1/2,j} \frac{\bar{v}_{i+1,j} - \bar{v}_{i,j}}{h_x^2} - \\ & - \left(\delta_v^{(1)}\right)_{i-1/2,j} \frac{\bar{v}_{i,j} - \bar{v}_{i-1,j}}{h_x^2} + \left(\delta_v^{(1)}\right)_{i,j+1/2} \frac{\bar{v}_{i,j+1} - \bar{v}_{i,j}}{h_y^2} - \\ & - \left(\delta_v^{(1)}\right)_{i,j-1/2} \frac{\bar{v}_{i,j} - \bar{v}_{i,j-1}}{h_y^2} + k^{(1)} \frac{R_{i,j+1} - R_{i,j-1}}{2h_y}. \end{aligned} \quad (11)$$

Запишем аппроксимацию уравнений для расчета скорости движения вредителей, находящихся в активном состоянии в случае граничных условиях первого рода:

- для компоненты  $\mathcal{U}$ :

$$\begin{aligned} & u_{i,j} = \left(\delta_v^{(2)}\right)_{i+1/2,j} \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{h_x^2} - \left(\delta_v^{(2)}\right)_{i-1/2,j} \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{h_x^2} + \\ & + \left(\delta_v^{(2)}\right)_{i,j+1/2} \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{h_y^2} - \left(\delta_v^{(2)}\right)_{i,j-1/2} \frac{u_{i,j} - u_{i,j-1}}{h_y^2} + k^{(2)} \frac{R_{i+1,j} - R_{i-1,j}}{2h_x}; \end{aligned} \quad (12)$$

- для компоненты  $\mathcal{V}$ :

$$\begin{aligned} & v_{i,j} = \left(\delta_v^{(2)}\right)_{i+1/2,j} \frac{v_{i+1,j} - v_{i,j}}{h_x^2} - \left(\delta_v^{(2)}\right)_{i-1/2,j} \frac{v_{i,j} - v_{i-1,j}}{h_x^2} + \\ & + \left(\delta_v^{(2)}\right)_{i,j+1/2} \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{h_y^2} - \left(\delta_v^{(2)}\right)_{i,j-1/2} \frac{v_{i,j} - v_{i,j-1}}{h_y^2} + k^{(2)} \frac{R_{i,j+1} - R_{i,j-1}}{2h_y}. \end{aligned} \quad (13)$$

Итак, построены дискретные аналоги операторов конвективного и диффузационного переноса для динамики фито- и зоопланктона. Аппроксимации уравнений для расчета скорости движения хищников, находящихся в активном состоянии и пассивном состоянии, существенно отличаются.

## VI. Спутниковые наблюдения

Чтобы подтвердить гипотезу о том, что существует корреляция между перемещениями фито- и зоопланктона, а также динамикой их биомасс, были проведены наблюдения спутниковых данных в акватории Азовского моря.

Основная роль зоопланктона в трансформации биогенных элементов связана с процессами минерализации органического вещества, причем ракообразные трансформируют около 11–14 % биогенных элементов, а простейшие 6–21 %. Интенсивность развития зоопланктона напрямую зависит от количества продукции формируемой фитопланктоном. Известно, что при увеличении количества органических соединений азота и фосфора наблюдается увеличение биомассы зоопланктона. По литературным данным, зоопланктон содержит фосфора от 3 до 5%, азота 10-20% от сухого веса (Wegl, 1983).

В исследовании использованы гидрометеорологические онлайн-карты и спутниковые снимки с ресурсов:

- earth.nullschool.net;
- windy.com;
- hydronom.fish;
- yandex.ru/pogoda;
- satellite-map.gosur.com;
- wind-map.gosur.com/ru/;
- [https://world-weather.ru/water-temperature/azov\\_sea/](https://world-weather.ru/water-temperature/azov_sea/);
- seatemperature.ru;
- hmc.meteorf.ru/sea/azov/ssh/ssha\_azov.html;
- [http://esimo.oceanography.ru/esp2/index/index/esp\\_id/11/section\\_id](http://esimo.oceanography.ru/esp2/index/index/esp_id/11/section_id);
- <https://gis-lab.info/qa/landsat-mosaics.html>.

Одно из последних крупных исследований зоопланктона Азовского моря и Таганрогского залива было проведено в летний период 2019 г. (в конце июля и начале августа). Пробы зоопланктона были собраны на НИС «Денеб» ЮНЦ РАН методом тотального вертикального лова, использовалась сеть Джеди (площадь входного отверстия 0,043 м<sup>2</sup>, размер ячей фильтрующего конуса 118 мкм). Был произведен полномасштабный отбор проб, охватывающий фактически всю акваторию моря.



Рис. 2. Схема станций отбора проб зоопланктона в Азовском море и Таганрогском заливе в июле-августе 2019 года

Всего в Азовском море в летний период было зарегистрировано 13 видов мезо- и 8 меропланктонных организмов. Мезозоопланктон был представлен:

- Rotifera (8 видов) – *Brachionus diversicornis* (Dad.), *Brachionus angularis* Goss, *Keratella cochlearis* (Goss.), *Filinia longiseta* (Ehr.), *Bipalpus hudsoni* (Imh.), *Trichocerca marina* (Dad.);
- Cladocera (2 вида) – *Pleopis polyphemoides* (Leuck.) и *Cornigerius maeoticus* (Peng.);
- Calanoida (1 вид) – *Acartia tonsa* Dan.;
- Cyclopoida (1 вид) – *Oithona similis* Claus, а также *Cyclops* sp.

В меропланктоне были отмечены *Gastropoda veliger*, ракушковый рак *Ostracoda* (*Euphilomedes interpuncta*), *Balanus improvisus* larvae Darv., *Bivalvia veliger*, *Gastropoda veliger*, *Polychaeta larvae*, *Mnemiopsis leidyi* (Agass.), *Zoea larvae*, *Nematoda*.

Количественные характеристики зоопланктона в Азовском море распределялись следующим образом. Численность общего мезозоопланктона варьировала в пределах 29–4287 экз./м<sup>3</sup> (в среднем 1247 экз./м<sup>3</sup>), биомасса 48,63–0,551 мг/м<sup>3</sup> (в среднем 13,4 мг/м<sup>3</sup>) и были на уровне величин половодного 2018 г. (табл. 1). Низкие качественные и количественные показатели зоопланктонного сообщества в июле – августе в Азовском море связаны с интенсивным развитием в это время гребневика *Mnemiopsis leidyi*. Он массово встречался на всех станциях Азовского моря, а на станциях 69 и 70 присутствовал только гребневик и единично личинки балануса и полихет. Наибольшая плотность зоопланктона была отмечена в южном районе на станции 62 (4287 экз./м<sup>3</sup> и 48,63 мг/м<sup>3</sup>), наименьшая – в центральном районе на станции 80 (140 экз./м<sup>3</sup> и 0,551 мг/м<sup>3</sup>) и восточном районе на станции 12 (29 экз./м<sup>3</sup> и 0,83 мг/м<sup>3</sup>). Доминирующей группой зоопланктона в Азовском море были копеподы – 80 % от общей численности зоопланктона, где обычно в летний период лидирует *Acartia tonsa*. Однако по данным 2019 г. трудно было выделить доминирующие виды, так как в разных районах они менялись. Так, в южном районе, подверженном влиянию черноморских вод, это были *Oithona similis* и *Pleopis polyphemoides* с численностью 3387 экз./м<sup>3</sup> и 871 экз./м<sup>3</sup> соответственно, в центральном и восточном – *Acartia tonsa* и *Oithona similis*.

Величина Cladocera в общей численности зоопланктона составляла 18%, отмечен был только ракок *Pleopis polyphemoides* с высокой численностью 871 экз./м<sup>3</sup> лишь в южном районе и единично в Темрюкском заливе. Rotifera в Азовском море имели весьма низкие значения численности и биомассы и составляли около 2% от общего зоопланктона, их средние значения численности и биомассы были 82 экз./м<sup>3</sup> и 0,088 мг/м<sup>3</sup>. По данным экспедиционных исследований ЮНЦ РАН в августе 2019 г., на акватории Азовского моря соленость менялась от 12,5 до 16,4 PSU, температура составляла 23,9–24 °C.

Поскольку получение архивных спутниковых данных не всегда возможно, то велись наблюдения и анализировались снимки с нескольких спутников в реальном времени.

Наблюдения поверхности воды показали, что распределение хлорофилла и, в целом, водорослей соответствуют распределению мутности и абсорбции органических и неорганических соединений в прибрежной зоне.

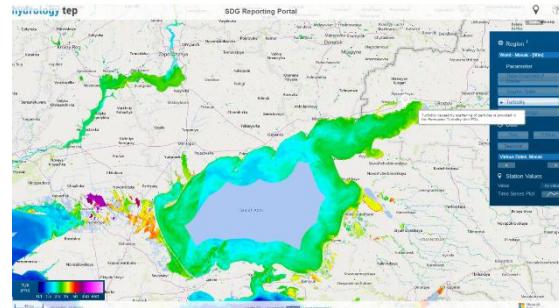


Рис. 3. Азовское море, мутность в прибрежной зоне

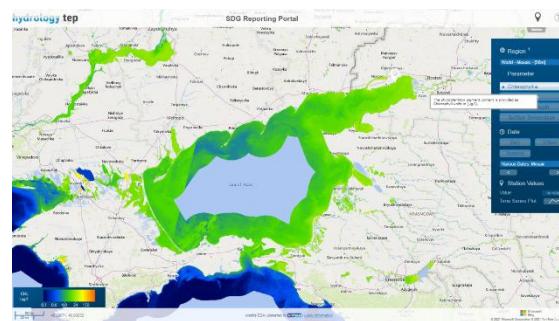


Рис. 4. Азовское море, распределение хлорофилла в прибрежной зоне

Как известно, вредоносные водоросли влияют на зоометрию водохранилищ. Большинство спутниковых данных по градиенту отслеживают распространение фитопланктона и по снимкам с трудом удается отделить фитопланктон от крупных водорослей (рис. 4).

Бурное развитие водорослей и фитопланктона при уменьшении количества пресноводных рыб в Азовском море говорит о том, что значительно уменьшился объем зоопланктона. В свою очередь, уменьшение количества пресноводных видов рыб связано с осолонением водоема (рис. 3).

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами исследования были проведены наблюдения динамики планктона по данным различным спутников, которые показали, что при незначительном воздействии механических факторов (вертикальные циркуляции (конвекционные токи) полные и частичные, обусловленные изменением плотности воды в связи с изменением ее температуры, ветровые перемешивания, турбулентные движения воды, течения, сейши, приток и сток в проточных водоемах и др.) распространение зоопланктона осуществляется в направлении роста биомассы фитопланктона – кормовой базы. Представив плотность хищников-зоопланктона в виде суммы видов с различными генотипами – с доминантными, рецессивными и смешанными признаками, можно построить модель «фито-зоопланктон» с учетом генотипа последних. Такая модель позволит прогнозировать плотность популяции планктона с учетом экологического влияния на среду и скорость мутации видов.

В рамках исследования были проанализированы современные подходы и модели популяционной генетики, которые можно было бы применить к моделям типа «фито-зоопланктон».

Разработана и численно исследована демо-генетическая модель типа «хищник-жертва» для зоо- и фитопланктона;

Проведен анализ спутниковых данных и наблюдений за динамикой распространения планктона на примере Азовского моря.

Генотип зоопланктона аналогично может приспособливаться к изменению кормовой базы, однако в их динамике численности играют большую роль конкурентные взаимоотношения и здесь более актуален демо-генетический подход на основе модели Костицина [5]. Особенности генетической изменчивости можно контролировать в закрытых промысловых водохранилищах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Созинов О.В. Генетически модифицированные растения для окружающей среды: конфликт интересов. Материалы научно-практического семинара «Экологические, правовые и медицинские аспекты биоэтики и биобезопасности»: – <http://edu.grsu.by/cei2011/?p=82>. 2011.
2. Кажарова И.А. Современные проблемы информатизации в экономике и обеспечение безопасности // Сборник трудов. Выпуск 13 (по итогам XIII Международной открытой научной конференции). – Воронеж, 2008. – С. 51-52.
3. Ижевский С.С., Жимерикин В.Н. Западный кукурузный жук Европе // Чужеродные виды на территории России. – 2005. – Url: [http://www.sevin.ru/invasive/publications/izhevsky\\_03\\_pr.html](http://www.sevin.ru/invasive/publications/izhevsky_03_pr.html).
4. Жадановская Е.А. Моделирование пространственно-временной динамики стеблевого кукурузного мотылька под воздействием трансгенной кукурузы: автореф. канд. физ.-мат. наук – Ростов-на-Дону. 2006. – С. 1-171..
5. Свирижев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ. – М.: Гл. редакция физ.-мат. лит-ры изд-ва «Наука», 1978. – С. 1-352.
6. Кобелев Н.Б. Повышение "электронной готовности" принимаемых решений на основе имитационного моделирования // Прикладная информатика. – 2006. – № 5. – С. 49-59.
7. Гродницкий Д.Л. Две теории биологической эволюции. – 2-е изд. – Саратов: "Научная книга", 2002. – С. 1-160.
8. Abrahamson D., Wilensky U. The quest of the bell curve: a constructionist approach to learning statistics through designing computer-based probability experiments / In Allessandra M., Battanero C., Biehler R, Henry M., Pratt D. Proce. 2003.
9. Nicholas P. Storer, Steven L. Peck. Spatial processes in the evolution of resistance in helicoverpa zea (lepidoptera: noctuidae) to bt transgenic corn and cotton in a mixed agroecosystem: a biology-rich stochastic simulation model / Plant resistance. May, 2002.
10. Vacher C., Bourguet D., Roussel F., Chevillon C. Hochberg M.E. High dose refuge strategies and genetically modified crops – reply to tabashnik et al. Journal of evolutionary biology. – 2004. – Vol. 17. – P. 913-918.

# Математическая модель тепловых процессов в двухфазных потоках теплоносителей

Ляшенко Александр Леонидович

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроительства  
Санкт-Петербург, Россия  
*akuna\_matata\_kmv@mail.ru*

**Аннотация.** Рассмотрена необходимость регулирования питания активной зоны реакторной установки, регулирование скорости теплоносителя в технологических каналах и поддержание технологических параметров на заданном уровне. В качестве объекта управления рассмотрена активная зона реактора РБМК-1000. Разработана методика моделирования объектов данного класса как объектов с распределёнными параметрами. Рассмотрение процессов, протекающих в технологических каналах, позволило составить дифференциальные уравнения движения, описывающие течение одно- и двухфазной рабочей среды в трубках парогенератора. Разработанная методика математического моделирования распространения тепла в технологических каналах активной зоны позволила составить математическую модель для рассматриваемого объекта. Для численного анализа рассматриваемого объекта управления были составлены дискретная модель уравнений и вычислительный алгоритм. Для компьютерного моделирования было специально разработано программное обеспечение. С его помощью были рассчитаны значения температур в контрольных точках. Значения, полученные путем моделирования, совпали с показаниями датчиков, которые установлены на реальном объекте.

**Abstract.** The necessity of regulating the power supply of the core of the reactor plant, regulating the coolant velocity in the technological channels and maintaining the technological parameters at a given level is considered. The core of the RBMK-1000 reactor is considered as a control object. A technique for modeling objects of this class as objects with distributed parameters has been developed. Consideration of the processes occurring in technological channels made it possible to compose differential equations of motion describing the flow of a single- and two-phase working medium in the steam generator tubes. The developed technique for mathematical modeling of heat propagation in the technological channels of the core made it possible to compile a mathematical model for the object under consideration. For the numerical analysis of the considered control object, a discrete model of equations and a computational algorithm were compiled. Software has been specially developed for computer simulation. With its help, the temperature values at the control points were calculated. The values obtained by simulation coincided with the readings of the sensors that are installed on the real object.

**Ключевые слова:** теплообмен, активная зона, объекты с распределёнными параметрами, дифференциальные уравнения, моделирование, системный анализ, управление, контроль, диагностика, обработка информации.

**Keywords:** Heat transfer, core, objects with distributed parameters, differential equations, modeling, system analysis, control, monitoring, diagnostics, information processing.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В природе существуют три элементарных способа передачи теплоты: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение [1] (радиационный теплообмен).

В природе и в технических устройствах все три способа передачи теплоты могут происходить одновременно или в комбинации друг с другом [2]. Такой теплообмен называют сложным теплообменом.

При энергетическом и технологическом использовании теплоты наибольшее распространение получили теплообменные аппараты. Примерами таких аппаратов могут служить активная зона (АЗ) атомной энергетической установки (АЭУ) или топочная камера парового котла тепловой электростанции (ТЭС) [3].

В данных аппаратах в зависимости от фазового состояния теплоносителя различают конвективный теплообмен в однофазной среде и конвективный теплообмен при фазовых превращениях, к которому относят теплообмен при конденсации и теплообмен при кипении.

В ядерной энергетике парожидкостные потоки занимают особое место, поскольку абсолютное большинство реакторов работают на воде. В парогенераторах, а рассматриваемые аппараты являются парогенераторами, образуется двухфазные потоки, представляющие собой пароводяную смесь. Формы движения двухфазных потоков значительно многообразнее, и их законы существенно сложнее, чем для однофазных сред. Это связано с наличием второй фазы, с тем, что силовые и тепловые взаимодействия возникают не только на границах потока с твердой стенкой, но и на поверхности раздела фаз внутри потока, кроме того сжимаемость пара значительно больше, чем у воды [4].

Фактором, ограничивающим мощность энергетической установки с парогенераторными аппаратами, во многих случаях является кризис, сопровождающийся ухудшением интенсивности теплообмена. Если создать условия, препятствующие наступлению кризиса, то тепловая мощность реакторов будет повышена, что даёт большой экономический эффект. Несмотря на то, что энергетические установки при нормальных условиях в целях безопасности работают при тепловых потоках ниже критических, могут возникнуть случаи, когда кризис будет достигнут. Поэтому нужны надежные рекомендации по расчету условий наступления кризиса. Их можно получить на основе четких представлений о ме-

ханизме возникновения кризиса. Кроме того требуется разработать ряд мер, направленных на предотвращение кризиса. Для этого требуется детальное понимание теплофизических процессов, протекающих в каналах активной зоны АЭУ или в экранах трубах топочных камер ТЭС.

## II. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Наступление кризиса теплообмена на плоской поверхности зависит от теплового потока, физических свойств жидкости и пара. При вынужденном движении, кроме этих параметров большую роль играет распределение температур, скоростей и фаз в потоке [5]. Механизм рассматриваемого явления зависит от теплогидравлических условий, от свойств жидкости, пара, массовой скорости, паросодержания и т.д. В зависимости от конкретных условий повышение температуры теплоотдающей стенки может составить единицы, и сотни градусов, а время возрастания от долей до сотен градусов может составить секунду.

Одним из основных процессов, протекающим в парогенераторной установке (ПГУ) является кипение, то есть процесс интенсивного парообразования в виде пузырьков или паровой прослойки (паровой пленки) в жидкости при температуре насыщения или выше этой температуры. При кипении поглощается теплота фазового перехода, поэтому процесс кипения неразрывно связан с теплообменом.

С помощью процесса кипения оказывается возможным отводить от поверхности большие тепловые потоки. Механизм отвода тепла от поверхности связан с конвективным движением жидкости и пара.

Конвекция теплоты происходит за счет перемещения макрообъемов среды из области с одной температурой в область с другой температурой. Конвекция протекает совместно с процессом теплопроводности. Сочетание конвекции и теплопроводности, наблюдаемое в текучих средах, называют конвективным теплообменом.

При вынужденной конвекции движение текучей среды происходит под действием внешней силы – разности давлений в потоке, которую создает какое-либо транспортирующее теплоноситель устройство, например, вентилятор, насос и т.п.

В векторной форме записи уравнение переноса энергии в текучей среде имеет вид [6, 7]:

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + w \nabla T \right) = \operatorname{div}[\lambda \operatorname{grad}(T)] + g_v + \mu \Phi - p \operatorname{div}(w) \quad (1)$$

где  $\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} \right)$  – слагаемое в правой части уравнения

энергии, которое отражает нестационарность процесса конвективного теплообмена – изменение внутренней энергии элементарного объема текучей среды во времени;  $\rho c w \nabla T$  – конвективный член уравнения энергии, учитывающий перенос теплоты за счет движения среды;  $\operatorname{div}[\lambda \operatorname{grad}(T)]$  – диффузионный член уравнения, учитывающий перенос теплоты теплопроводностью;  $g_v$  – источниковый член уравнения, учитывающий поступление или убыль энергии за счет действия внутренних источников или стоков теплоты;  $\mu \Phi$  – слагаемое уравнения

энергии, учитывающее нагрев текучей среды вследствие диссипации кинетической энергии движения за счет трения;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости;  $\Phi$  – диссипативная функция;  $p \operatorname{div}(w)$  – слагаемое уравнения энергии, учитывающее изменение энергии теплоносителя при его идеальном сжатии или расширении.

Последние два слагаемых в уравнении переноса энергии в значительной степени зависят от скорости движения среды и для скоростей менее 100 м/с, характерных для энергетических и теплотехнологических агрегатов.

Запишем уравнение (1) для графитовой кладки:

$$\frac{\partial T_{p,f}(x,y,z,t)}{\partial t} = a_r \left[ \frac{\partial^2 T_{p,f}(x,y,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(x,y,z,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(x,y,z,t)}{\partial z^2} \right] + \frac{a_r W_f}{\lambda_r V_r} \quad (2)$$

где  $a_r$  – коэффициент температуропроводности графита;

$x, y, z$  – геометрические координаты;

$W_f$  – выделяемая в графите мощность, при торможении нейтронов;

$V_r$  – объём, занимаемый графитовым блоком;

$\lambda_r$  – коэффициент теплопроводности графита.

Запишем дифференциальные уравнения теплопроводности применительно к трубе из циркония.

$$\frac{\partial T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial t} = a_\zeta \left[ \frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial y^2} \right] \quad (3)$$

$$Y1 < y < Y2, \quad R2 < R < R3$$

где  $a_\zeta$  – коэффициент температуропроводности циркония.

Как уже отмечалось, кипение является основным процессом в парогенераторной установке. На рис. 1 показаны режимы процесса кипения.

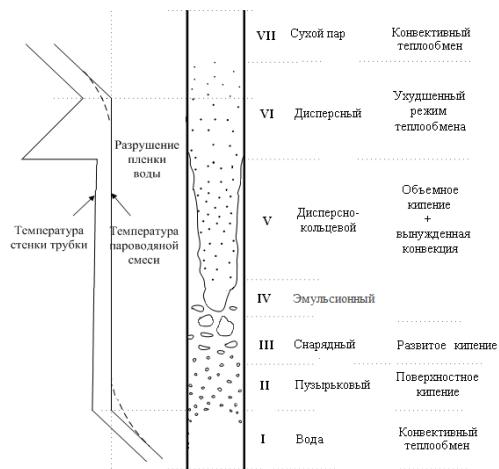


Рис. 1. Основные режимы двухфазных потоков и графики изменения температур вдоль канала

Основными режимами вертикального двухфазного потока по мере увеличения паросодержания являются пузырьковый, снарядный, эмульсионный, дисперсно-кольцевой и дисперсный.

Как известно из [6, 8, 9] в вертикальных трубах парогенераторов АЭУ преимущественно поддерживаются только 4 режима течения, а именно: эмульсионный, кольцевой, снарядный и пузырьковый.

На входе в канал жидкость подогрета до температуры насыщения при заданном давлении, а плотность теплового потока и условия теплообмена таковы, что на некотором расстоянии, начиная от входа в канал, температура стенки ниже температуры насыщения, в связи с этим всегда имеется участок, где кипение отсутствует (область I на рис. 1). При постоянном тепловом потоке на участке теплообмена в однофазной среде температура стенки непрерывно увеличивается по мере удаления от входа в следствии повышения температуры жидкости, пока не будет достигнута величина перегрева стенки, необходимая для начала парообразования. Далее начинается процесс кипения.

Анализ показывает, что для заданного диаметра труб режим адиабатного пароводяного потока можно определить однозначной функцией трех переменных: давления, массовой скорости и паросодержания.

Оценки для пароводяной смеси можно выполнить по следующим соотношениям [10].

Нижняя граница пузырькового режима

$$x = -(3.5 \pm 0.3) \cdot 10^2 \frac{q}{r \cdot \rho \cdot w} \left[ \frac{\rho \cdot w \cdot d}{\mu'} \right]^{0.6} \left( \frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0.33}. \quad (4)$$

Граница перехода от снарядного к эмульсионному режиму

$$x = (4.5 \pm 1.5) \cdot 10^{-2} \left[ \frac{(\rho')^2 \cdot g \cdot d}{(\rho \cdot w)^2} \right]^{0.25}. \quad (5)$$

Граница дисперсно-кольцевого режима

$$x = (2.7 \pm 0.3) \left[ \frac{\rho'' \cdot \sigma}{(\rho \cdot w)^2 \cdot d} \right]^{0.25} \left( \frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0.33}. \quad (6)$$

В данных выражениях приняты следующие обозначения:

$q$  – тепловой поток  $Bm/m^2$ ;  $d$  – диаметр трубы  $m$ ;  $\rho w$  – массовая скорость теплоносителя;  $\rho'$  – плотность воды на линии насыщения,  $kg/m^3$ ;  $\rho''$  – плотность пара,  $kg/m^3$ ;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $N/m$ ;  $r$  – удельная теплота парообразования,  $kДж/kg$ .

Удельная теплота парообразования рассчитывается по выражению

$$r = h'' - h'.$$

Энталпия воды на входе в трубы технологического канала определяется по формулам [8]:

$$h' = \frac{h_{ne} G_{ne}^{n/n} + h_{ce} (G_{KMPЦ}^{n/n} - G_{ne}^{n/n})}{G_{KMPЦ}^{n/n}}. \quad (7)$$

где  $G_{KMPЦ}^{n/n}$  – расход теплоносителя в КМПЦ через половину реактора,  $m^3/\text{час}$ ;

$G_{ne}^{n/n}$  – расход питательной воды на половину реактора,  $t/\text{час}$ ;

$h_{ne} = f(t_{ne})$  – энталпия питательной воды;

$h_{sep} = f(P_{бс})$  – энталпия воды в барабан-сепараторе.

Для точного учета границ экономайзерного участка паросодержание в активной зоне рассчитывается с учетом поверхностного кипения. Для этого вычисляется энталпия начала закипания [8]:

$$h_{hk} = h' - 55 \cdot \frac{q_{i,S}}{G} \left( \frac{\nu'}{\nu''} \cdot \frac{d}{\nu' \cdot 3600} \cdot \sqrt{\frac{q_i \cdot G \cdot \nu' \cdot \nu''}{r \cdot S}} \right)^{0.3}. \quad (8)$$

$$q_i = \frac{W_k \cdot 860}{F_{men}} \cdot K_{яч} \cdot \frac{\Phi(z)}{\Phi_{cp}} \cdot (1 - \eta_{cp});$$

где  $q_i$  – тепловой поток на участке,  $ккал/ч \cdot м^2$ ;

$F_{men}$  – поверхность теплообмена ТВС,  $м^2$ ;

$K_{яч}$  – коэффициент тепловыделения по сечению ТВС;

$\eta_{cp}$  – относительная доля тепла, уходящего в графит;

$r$  – теплота парообразования,  $ккал/кг$ ;

$\Phi_{cp}$  – среднее по высоте значение  $\Phi(z)$ .

$\Phi(z)$  – высотное распределение энерговыделения по данной половине реактора

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, была разработана математическая модель, позволяющая моделировать тепловые процессы в двухфазных потоках в парогенераторах. Полученные уравнения были решены с применением методов математической физики [11]. Адекватность модели была проверена путем сравнения результатов вычислительного эксперимента с результатами, полученными на исследуемом объекте.

В технологических каналах (ТК) реактора наблюдаются две основных области с разной структурой потока при движении пароводяной смеси по направлению снизу вверх:

Первая область – область подогрева, представляющая собой экономайзерный участок, в верхней точке которого температура стенки равна температуре насыщения.

Вторая область – область кипения, или испарительный участок.

Принципиально важно поддерживать экономайзерную зону на заданном уровне. Нарушение данного уровня приводит к кризису теплообмену и как следствие к аварии. В связи с этим была разработана система управления, обеспечивающая поддержание заданных значений температур в контрольных точках, в основе которой находится разработанная математическая модель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Г.Н. Общая теплотехника: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1980. – 552 с.
2. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 550 с.
3. Бухмиров В.В. Тепломассообмен: учебное пособие. ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 360 с.
4. Тепловые и атомные электрические станции / под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. –3-е изд., перераб. – М.: МЭИ, 2003. – 320 с.
5. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. – 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1984.
6. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоиздат, 1990. – 360 с.
7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
8. Абрамов М.А., Авдеев В.И., Адамов Е.О. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК / под общей редакцией Ю.М. Черкашова. – М.: ГУП НИКИЭТ, 2006. – 632 с.
9. Доллежаль Н.А., Емельянов И.Я. Канальный ядерный энергетический реактор. – М.: Атомиздат, 1980. – 254 с.
10. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат. 1984.
11. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы математической физики. – М.: Научный мир, 2000. – 316 с.

# Перспективы строительства субтерагерцового радиотелескопа на Северном Кавказе

**Вдовин Вячеслав Федорович**

Институт прикладной физики РАН  
Нижний Новгород, Россия  
*vdozin\_iap@mail.ru*

**Марухно Андрей Сергеевич**

Специальная астрофизическая обсерватория РАН  
Нижний Архыз, Россия  
*mas@sao.ru*

**Аннотация.** Новые радиотелескопы активно строятся в мире и планы создания российских инструментов обсуждаются регулярно. Радиометры нужны не только для исследования Вселенной, лежащей за пределами атмосферы, но и для изучения самой атмосферы. Одной из самых перспективных задач развития наземной астрономии является постройка первого в России субтерагерцового (субТГц) телескопа, с помощью которого можно выполнять широкий круг задач: от перспективных мобильных сетей 6/7 Г, дальней космической связи и радиолокации «космического мусора», до сбора данных для моделирования первых мгновений после Большого взрыва и включение новой точки в телескоп горизонта событий. В данной работе представлены результаты исследования новых перспективных площадок с обнадеживающим микроволновым астроклиматом для возможного строительства телескопа субТГц диапазона частот. А так же приводится сравнение результатов с ранее исследованными площадками на БТА (САО РАН) и Кавказской горной обсерватории (ГАИШ МГУ).

**Abstract.** New radio telescopes are being actively built around the world, and plans to create Russian instruments are regularly discussed. They are needed not only to study the universe outside the atmosphere, but also to study the atmosphere itself. One of the most promising tasks for the development of ground-based astronomy is the construction of Russia's first subterahertz (subTHz) telescope, which will be able to solve a wide range of tasks: from advanced 6/7G mobile networks to deep space communications and space debris radar, to collecting data for simulation of the first moments after the Big Bang and inclusion of a new point in the event horizon telescope. This paper presents the results of a study of new promising areas with an encouraging microwave astroclimate for the possible construction of a telescope in the subhertz frequency range. As well as a comparison of the results with previously studied sites at the BTA (SAO RAS) and the Caucasian Mountain Observatory (GAIsh MGU).

**Ключевые слова:** терагерцовые волны; миллиметровые и субмиллиметровые волны; радары; космическая связь; распространение волн в атмосфере; астроклимат; радиотелескопы.

**Keyword:** Terahertz waves; MM and subMM waves; radars; space communications; atmosphere propagation; astroclimat; radio telescopes.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитное поле несет исключительно большой объем информации об излучающем его объекте. Число «степеней свободы» его практически не ограни-

чено, и каждая «степень» свободы несет ту или иную информацию о формах объекта, о его химическом составе, спектре излучения, характере микро- и макропроцессов внутри объекта, о его развитии и физических условиях, в которых находится излучающее тело.

Изучение явлений природы, имеющих отношение к терагерцовому (ТГц) диапазону частот электромагнитного излучения и определяемому как 0.3-10 ТГц (диапазон длин волн 1 мм-30 мкм), сейчас признается как одно из передовых и прорывных направлений фундаментальной науки и техники. Многие фундаментальные научные исследования и разработки современных технологий ТГц диапазона остаются еще малоразвитыми по сравнению с относительно развитой областью науки и техники электромагнитного излучения микроволнового и оптического диапазонов частот.

До недавнего времени астрофизические исследования в субтерагерцовом диапазоне практически не проводились, а ведь в этом диапазоне наблюдаются самые интересные явления: космический микроволновый фон, оставшийся после Большого взрыва; процессы формирования и эволюции звезд; следы ранее ненаблюдавшихся космических объектов и многие другие. Так же использование этого диапазона имеет и большое количество прикладных задач: перспективные мобильные сети 6/7G, дальняя космическая связь, радиолокация космического мусора. Активное развитие данного направления исследования стало возможным благодаря техническому прогрессу в разработке и создании приборов, работающих на частотах от 0.1 до 1 ТГц. Это и антенны и малошумящие приемники и другая аппаратура. Одной из самых перспективных задач развития наземной астрономии является создание первого в России субтерагерцового (субТГц) телескопа. Это даст возможность войти в сеть телескопов, которые составляют радиоинтерферометр со сверхдлинной базой (РСДБ), и, в частности, его версия для субТГц диапазона - «Телескоп горизонта событий» (ТГС). В рамках этого международного проекта одновременно и слаженно работает десяток, разбросанных по всему миру инструментов, создавая единый виртуальный телескоп размером с земной шар. Сеть ТГС приглашает новых участников, а в северной Евразии имеется большая прореха, по этой причине у России есть большой шанс заполнить эту нишу.

Для постройки радиотелескопа субТГц диапазона длин волн нужна площадка с хорошими астроклиматическими характеристиками в соответствующих окнах

прозрачности. Существует множество теоретических исследований микроволнового астроклиматов, построенных на метео и спутниковых данных по влагосодержанию атмосферы. Наиболее эффективными на сегодняшний день инструментом изучения атмосферы стали измерения прозрачности атмосферы на более коротких, чем субТГц волнах, – оптика и ИК диапазоны. Все эти данные достоверно определяют одну из основных поглощающих данный тип волн компонент – воду. Однако микроволновый астроклимат существенно отличается от давно исследуемого оптического астроклиматов и радиочастотной диагностики, и поэтому требуются дополнительные натурные прямые измерения на субТГц волнах для выявления перспективных площадок для субТГц инструментов. Типичный профиль атмосферного поглощения показан на рис. 1.

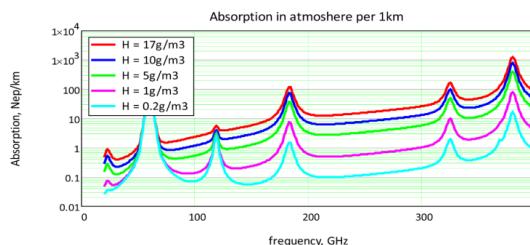


Рис. 1. Профиль атмосферного поглощения

Величина поглощения рассчитывается по формуле 1

$$\tau_{tot}(\lambda, h, W, Q) = \alpha(\lambda) \cdot \exp\left(\frac{-h}{h_0}\right) + \beta(\lambda) \cdot W + \gamma(\lambda) \cdot Q,$$

где  $\tau_{tot}$  – наблюдаемая оптическая толщина (Неп),  
 $h$  – высота над уровнем моря (км),  
 $h_0$  – характеристическая высота кислорода = 5.3 (км),  
 $W$  – количество осаждаемой воды, PWV (мм),  
 $Q$  – водозапас облаков (кг/м<sup>3</sup>),  
 $\alpha$  – кислородная часть поглощения на уровне моря (Неп),  
 $\beta$  – удельное поглощение в парах воды (Неп/мм),  
 $\gamma$  – удельное поглощение в облачности (Неп·м<sup>3</sup>/кг).

Как видно из формулы, основное поглощение возникает в молекулах кислорода, в парах воды и облаках. Поэтому площадки для таких телескопов стараются построить как можно выше и в сухом климате. Самой лучшей площадкой для постройки такого телескопа является высокогорная пустыня, пример – пустыня Атакама в Чили.

Оптические средства измерения или спутниковые данные, включая GSNN, «не видят» весьма широкие, в силу довольно высокой концентрации, кислородные линии поглощения в субТГц диапазоне. Поэтому оценка перспектив площадки исключительно по влагосодержанию не вполне корректна, и требуются прямые измерения непосредственно на субТГц волнах.

Исследования астроклиматов разделяют на два вида: стационарные и экспедиционные. Стационарные исследования производят на уже работающих обсерваториях, так как там есть все необходимая инфраструктура и квалификационные кадры. А так же ведется постоянный мониторинг погоды. Экспедиционные, это короткие циклы измерений, с целью поиска новых мест для подходящих площадок. Стационарные исследования позволяют проводить длительные циклы наблюдений, использовать

больший арсенал различных приборов. А экспедиционные характеризуются малой продолжительностью. Поэтому при подготовке к экспедиционным исследованиям требуется изучить/получить статистически достоверные метеоданные от специализированных спутников, исследовать местность и многое другое.

В России, поиск такой площадки на Северном Кавказе производится с 2014 года. Экспедиции начались с анализа микроволнового астроклиматов по косвенным показателям: уровню осадков и влажности атмосферы. В общей сложности проведено 15 стационарных (с длительностью циклов измерений от 1 месяца до одного года) и 10 экспедиционных (с длительностью циклов от 1 часа до 3 суток) исследований. Измерения поглощения проводились с помощью двухчастотного радиометра МИАП-2, разработанного ИПФ РАН и ЗАО ГИКОМ в разное время года, на разных по высоте площадках, а также в трех местах с развитой астрономической инфраструктурой:

- п. Нижний Архыз, БТА, Верхняя научная площадка, 2070м (САО РАН);
- г. Шатджаатмаз, Кавказская горная обсерватория, 2112м (ГАИШ МГУ);
- пик Терскол, 3127м (ИНСАН, НАНУ (Украина)).

Исследования показали, что все исследованные площадки оказались малопригодными для субТГц наблюдений. Атмосфера западной части Кавказа чересчур влажная: воздушные массы Черного моря сильно сказываются на поглощении микроволн. Часть измерений проводилась с целью выявления влияния высоты на величину поглощения. Для этого измерения проводились на одной площадке (2070 м), затем прибор поднимали на высоту 2733м, производили измерения в течение 2 часов и спускали прибор опять на высоту 2070 м. Подобный эксперимент позволял увидеть разницу в величине поглощения и экспериментально показывал влияние кислородной составляющей на величину поглощения.

Была проверена гипотеза о перспективности самой высокой точки Кавказа – горы Эльбрус, где и были проведены измерения. Размещать телескоп на труднодоступной вершине горы никто не собирается, но исследовать особенности астроклиматов было очень интересно. Прибор разместили на высоте 5642м, и получили неплохой уровень поглощения, но далеко не такой низкий, как хотелось, и очень далекий до уровня расположенного на такой же высоте в пустыне Атакама телескопа ALMA. Данная экспедиция подтвердила, что Западная часть Северного Кавказа является малопригодной для субТГц астрономии и, даже по российским меркам, уступает по качеству микроволнового астроклиматов склонам гор в Якутии (пик Муус-Хая) или Саянах в Бурятии (станция ИСЗФ СО РАН «Монды»).

Решено было провести цикл экспедиционных измерений в восточной части Северного Кавказа. Подготовка к экспедициям началась с анализа микроволнового астроклиматов по косвенным показателям: уровню осадков и влажности атмосферы. Они показали довольно значительное отличие восточной и западной частей Северного Кавказа. Кроме того, по данным повторного анализа

ERA-5 и анализу данных полученных со спутников GNSS были построены пространственные распределения осажденного водяного пара (PWV) по сезонам за период с 2011 по 2020 гг. В связи с тем, что данные ERA-5 ограничены по пространственному разрешению 30 километрами, и не учитывают условия пересеченного рельефа, а именно гористая местность и представляет наибольший интерес для исследований астроклиматата, была выполнена привязка данных PWV к высотам вершин оцениваемых перспективных гор согласно формуле:

$$PWV = PWV_0 \exp\left(\frac{C_{PWV} \delta_z}{1000}\right), \quad (2)$$

где  $\delta_z$  – перепад высот для рассматриваемого места,

$C_{PWV}$  – коэффициент пропорциональности.

Пятно разрешения покрывает и сухие и безкислородные горные вершины, и влажные, насыщенные кислородом ущелья. Более точные теоретические оценки можно было бы сделать, не просто учитывая экспоненту по формуле (2), а дополнив ее показателями шероховатости поверхности внутри пятна разрешения. Параметр определяющий шероховатость известен как среднеквадратическое отклонение – СКО, но этих данных для гор не существует, как не существует, строго говоря, точных данных о площади поверхности республики Дагестан (с учетом его изрезанности), в отличие от площади территории в плане на карте. Учитывая большую изрезанность поверхности Дагестана по сравнению с Тибетом, невозможно ограничиться набором доступных спутниковых и метеоданных для достоверной оценки реального микроволнового астроклиматата, как это сделано для Тибета.

И все же, приведенные оценки по осажденной воде, даже без учета кислорода и облачности, позволили изначально просто по изучению карты осадков Кавказа сформулировать гипотезу о том, что восточные области объективно лучше для субТГц, чем западные области Кавказа. Для экспериментальной проверки гипотезы были выбраны следующие перспективные площадки, расположенные восточнее ранее обследованных: Чечня, Северная Осетия, Ингушетия и Дагестан.

В Чечню было организовано две поездки. Первая пробная поездка по выбору возможного места расположения обсерватории и инструментальных измерений астроклиматата состоялась в юго-западную часть республики (ближе к границе с Ингушетией, Осетией и Грузией) в направлении горы Тебулосмта, 4493 м. Поскольку это приграничные с Грузией регионы, и доступ туда ограничен, инструментальные обследования отложены. Но неподалеку в Галанчожском районе выявлено ряд пригодных для измерений перспективных площадок с сухим климатом и дорогами удовлетворительного качества.

Вторая поездка в направлении юго-восток в окрестности пограничного с Дагестаном озера Кезеной-Ам также продемонстрировала наличие перспективных площадок на высоте около 3000 м над уровнем моря и с развитой инфраструктурой.

Следующий экспедиционный цикл, состоявшийся в первой декаде ноября 2021 г. охватывал две площадки в Дагестане: в Гунибском районе (гора Маяк, 2700 м) и на горе Шалбуздаг (4142 м). Завершился цикл измерениями в Северной Осетии (Столовая гора, ~3000 м).

Предварительные результаты измерений на всех трех площадках показали обнадеживающие вплоть до окна прозрачности 1.3 мм результаты по уровню атмосферного поглощения, учитывая неоптимальный по измерениям сезон. Микроволновый астроклимат испытывает хорошо изученные сезонные вариации и кратковременные измерения несложно сопоставить с долговременными, проведя внесение поправки на текущий сезон. Все измерения, включая предшествовавшие экспедиции и выполненные сразу по ее окончании в САО, были проведены в довольно короткий период (всего неделя с 4 по 10 ноября), когда сезонной вариабельностью астроклиматата можно пренебречь. Окно прозрачности 1.3 мм оценивалось экстраполяцией по прямым измеренным данным в окнах прозрачности 3 и 2 мм.

В перспективе предполагается доработать измерительный комплекс двумя дополнительными каналами, работающими в полосах 1.3 и 0.8 мм – основными окнами прозрачности атмосферы для субТГц диапазона. Именно в окне прозрачности 1.3 мм работает ТГС, а также предполагается развитие мировой интерферометрической сети в окне прозрачности 0.8 мм. Дальнейшее продвижение субТГц наземных инструментов вверх по частоте представляется перспективным лишь для уникальных по астроклимату мест наподобие пустыни Атакама, но в России таких мест по климату нет. Два наиболее длинноволновых субТГц окна прозрачности (2 и 3 мм) не требуют поиска высокогорной площадки. На волне 3 мм можно довольно эффективно работать и на уровне моря, для окна 2 мм вполне достаточно подъема на высоту 1-2 км. Полученные в экспедиции результаты в настоящий момент обрабатываются и будут представлены в развернутом виде.

В рамках проведенного цикла исследований не удалось посетить ряд еще более перспективных площадок на востоке Кавказа. Их посещение запланировано на следующий сезон. В частности, если влажность западного Кавказа определяется близостью (~100 км) Черного моря, то крайний восток Дагестана уже находится в зоне климатического влияния Каспия. И Шалбуздаг, лучшая из трех обследованных площадок, находится ближе, чем 100 км от Каспия, что не может не приносить влагу. По данным анализа данных ERA 5 совместно с обработкой фазовых измерений двухчастотных сигналов с GNSS-приемников получены величины весьма малой тропосферной задержки и влагосодержания на большем расстоянии от Каспия. Из чего следует, что если сместиться чуть западнее в направлении Чечни, чтобы обеспечить не менее 200 км от Каспия, то результаты могут быть лучше. В этой области предлагается изучить два района горного Дагестана – Рутульский и Агульский. В Агульском находятся сравнительно легко доступные горы Хорай (3521 м) и Карак (2876 м). В Рутульском районе, следует обратить внимание на окружающие Аракуль и Хачаралу холмы и горы, в частности, Синдаку (2847 м) и Хунзундайлбак (3676 м). Пока нельзя снимать с рассмотрения приграничные с Азербайджаном самые высокие горы Дагестана Ерыдаг (3925 м) и Базардюзю (4466 м). Но здесь могут помешать, даже для проведения тестовых измерений, особенности приграничного режима, да и близость Каспия.

Основной результат прошедшей в 2021 г экспедиции: перспективность площадок восточного Кавказа доказана, но требует более детального и длительного инструментального исследования для принятия решения о размещении высокоэффективного инструмента, работающего в субТГц диапазоне частот.

# Аппаратурно-методическое обеспечение наблюдений звезд с высоким спектральным разрешением

**Верич Юрий Борисович**  
Служба эксплуатации БТА  
Специальная астрофизическая  
обсерватория РАН  
Нижний Архыз, Россия  
[yu.verich@gmail.com](mailto:yu.verich@gmail.com)

**Панчук Владимир Евгеньевич**  
Лаборатория астроспектроскопии  
Специальная астрофизическая  
обсерватория РАН  
Нижний Архыз, Россия  
[panchuk@ya.ru](mailto:panchuk@ya.ru)

**Юшкун Максим Владимирович**  
Лаборатория астроспектроскопии  
Специальная астрофизическая  
обсерватория РАН  
Нижний Архыз, Россия  
[yutaks@gmail.com](mailto:yutaks@gmail.com)

**Аннотация.** Сообщается о разработке нескольких проектов, направленных на повышение эффективности спектроскопии звезд на телескопах различного диаметра. Использованы современные методы проектирования, изготовления, тестирования узлов и схем спектральной аппаратуры высокого разрешения.

**Abstract.** It is reported that several projects are being developed aimed at improving the efficiency of spectroscopy of stars on telescopes of various diameters. Modern methods of designing, manufacturing, testing of nodes and circuits of high-resolution spectral equipment were used.

**Ключевые слова:** астрономические спектрографы, оптические телескопы, системы управления.

**Keywords:** astronomical spectrographs, optical telescopes, control systems.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Спектры звезд содержат информацию, формирующую наши представления о Вселенной. Спектры галактик представляют собой совокупности спектров звезд и межзвездной среды. Для определения температуры, плотности и химического состава звездной атмосферы, необходимо измерить характеристики отдельных спектральных линий, что предпочтительнее проводить по результатам наблюдений с высоким спектральным разрешением. В период становления звездной спектроскопии преобладали фотографические методы регистрации звездных спектров. Вследствие низкой квантовой эффективности фотопластинок наблюдения с высоким спектральным разрешением выполнялись только на крупнейших телескопах мира. Появление и развитие средств регистрации слабых потоков излучения расширило возможности звездной спектроскопии. Астрономы последовательно освоили фотоэлектронные умножители (ФЭУ), электронно-оптические преобразователи (ЭОП), телевизионные системы счета фотонов, диодные линейки, матрицы приборов с зарядовой связью (ПЗС). Спектроскопия распространилась и на телескопы средних и малых диаметров, что расширило как круг задач, так и численность спектроскопистов-наблюдателей. Эти процессы принципиально увеличили роль инженерной компоненты в создании и обеспечении новых методов спектроскопических наблюдений.

Работы по автоматизации эшелле-спектрополяриметра первичного фокуса БТА поддержаны по проекту РНФ 22-12-00069.

Если ранее астроном, пользовался спектрографом как оптико-механическим прибором, вручную изменяя и настраивая рабочую конфигурацию, то сегодня спектральные наблюдения не представляются без прецизионной автоматики, электромеханических устройств, и соответствующего математического обеспечения. Возрастает роль дистанционных методов контроля и управления наблюдениями. Промышленная разработка и производство астрономических спектральных приборов в нашей стране прекращены ещё в прошлом веке, и все ныне работающие спектрографы созданы на отечественных обсерваториях.

Ограничиваюсь далее проблемами спектроскопии звёзд, отметим, что здесь, кроме классических проблем (приоритет, отдаваемый на больших телескопах задачам внегалактической астрономии перед исследованиями звезд; большие потери света в спектроскопии высокого разрешения), добавились новые. Во-первых, автоматизация крупногабаритных спектрографов высокого разрешения, стационарно установленных на БТА, представляет собой задачу, отличную от автоматизации переносного навесного оборудования, используемого в главном фокусе БТА. Все наши работы на стационарных спектрографах выполнялись без выведения телескопа из режима обеспечения расписания наблюдений. Во-вторых, разработка светоприемников и систем управления экспериментом, а также последующая эксплуатация выполнялась специалистами существенно различающегося уровня, соответственно. Это, во избежание потерь наблюдательного времени, требовало дополнительных трудозатрат от астронома. В-третьих, уникальное спектроскопическое оборудование, работающее на БТА, используется и для подготовки молодых специалистов, причем во время, предназначенное для выполнения научных программ.

## II. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В нашем исследовании были поставлены и решены следующие задачи.

А. Разработать комплексный подход к повышению эффективности спектральной аппаратуры высокого разрешения, используемой на 6-метровом телескопе БТА и других телескопах. Комплексность подхода состоит в том, что при создании новых устройств и узлов, необходимо

димо было разработать новые методы проектирования, изготовления и тестирования оптико-механических конструкций. Также использовался опыт разработки и эксплуатации спектральной аппаратуры предыдущего поколения [1–6].

Б. Разработать новые спектроскопические средства наблюдений для телескопов средних и малых диаметров. Это необходимо как для разгрузки крупных телескопов от задач учебного характера, так и для популяризации методов астрономической спектроскопии.

В. Разработать методы и средства удаленного контроля и управления аппаратурой высокого и умеренного спектрального разрешения.

### III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

#### A. Для 6-метрового телескопа БТА:

Разработаны механизм и алгоритмы компенсации вращения поля в фокусе БТА «Нэсмит-2». Это позволит выполнять, в режиме «длинная щель»: а) одновременные спектроскопические наблюдения тесных двойных звезд (для определения относительных движений по эффекту Доплера), б) спектроскопию планетарных туманностей (для определения скорости движения вещества по линиям и ионам разных элементов) [7], в) спектроскопию дисков планет (для изучения крупномасштабных движений в планетных атмосферах).

Разработаны новая схема контроля изображения звезды на входе спектрографа, механизм и алгоритмы быстрой коррекции качества звездных изображений [8]. Это позволяет увеличить световую эффективность наблюдений в 2–3 раза.

Разработан метод согласования положений изображения звезды, формируемого оптикой БТА и оптикой 70-сантиметрового вспомогательного телескопа [9]. Это позволит выполнять спектрофотометрические наблюдения одновременно со спектроскопией высокого разрешения.

Разработаны конструкция предщелевой части и средства управления для эшелле-спектрополяриметра высокого разрешения в первичном фокусе БТА [10–12]. Это позволяет выполнять спектрополяриметрию звезд на принципиально новом уровне информативности. По сравнению со спектрополяриметрией на Основном звездном спектрографе БТА [13] добавляется возможность измерения линейной поляризации, вдвое увеличивается спектральное разрешение и в 15 раз – одновременно регистрируемый диапазон длин волн.

Разработаны и изготовлены узлы предщелевой части спектрографов фокуса Нэсмит-2, составляющие основу проекта повышения их эксплуатационных характеристик [14].

#### B. Для телескопов среднего диаметра:

Разработана система управления оптоволоконным спектрографом высокого разрешения [15, 16].

Разработана система управления универсальным устройством подготовки спектра калибровки [17].

Разработана конструкция и система управления эшелле спектрографом фокуса Кассегрена 1-метрового телескопа [18, 19].

#### C. Для телескопов малого диаметра:

Разработаны оптико-механическая конструкция и система управления эшелле спектрографом фокуса Ньютона [20].

Разработана схема автоколлимационного однопорядкового спектрографа для телескопа малого диаметра [21].

Разработана и внедрена методика проектирования и изготовления прецизионных оптико-механических деталей для малогабаритных спектрографов. При изготовлении использованы как специально разработанный оригинальный фрезерный станок, так и серийные промышленные станки с ЧПУ.

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Факторами, объединяющими вышеупомянутые работы, является применение современной элементной базы, перспективных систем проектирования, и собственных алгоритмических разработок. Преимуществом данной работы является то, что исследования выполняются непосредственно в обсерватории, с короткой обратной связью «астроном-инженер», включая участие авторов в лабораторных испытаниях, астрономических экспериментах и организации процесса эксплуатации БТА. В результате данной работы появились новые спектральные приборы и устройства (или их макеты), которые могут быть использованы как в научных целях, так и для подготовки специалистов.

Считаем необходимым отметить ещё один фактор, определяющий перспективы наземной спектроскопии высокого разрешения и преимущества перед другими наземными оптическими методами. На рис.1 приведен вид современного ночного неба, где хорошо видны типы помех, затрудняющих как получение прямых снимков звёздного неба, так и спектроскопию среднего и низкого разрешения. В спектроскопии высокого разрешения эти помехи незначительны или устранимы при цифровой обработке изображений спектров.



Рис. 1. Вид неба (по материалам Международного астрономического союза [22]). Момент прохождения спутников Starlink над Национальным заповедником Карсон, Нью-Мексико. Северный полюс мира – слева вверху, вне кадра. Наблюдаются: голубой сумеречный фрагмент, оранжевый пояс подсветки урбанистического происхождения, короткие штрихи – следы звёзд, тонкие вертикальные дуги – следы спутников, вскоре после запуска

Основные научно-организационные особенности наземной астрономической спектроскопии высокого разрешения были перечислены в [23].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гажур Э.Б., Ключкова В.Г., Панчук В.Е. Опыт работы с эшелле-спектрометром Зебра на 6- метровом телескопе. // Письма в Астрон. ж. – 1990. – Т. 16. – С. 473-480.
2. Ключкова В.Г., Панчук В.Е., Рядченко В.П. Автоколлимационный эшелле-спектрометр 6-м телескопа // Письма в Астрон. ж. – 1991. – Т. 17. – С. 645-652.
3. Панчук В.Е., Ключкова В.Г., Галазутдинов Г.А., Рядченко В.П., Ченцов Е.Л. Эшелле-спектрометр с матрицей ПЗС для 6-м телескопа // Письма в Астрон. ж. – 1993. – Т. 19. – С. 1061-1069.
4. Panchuk V.E., Najdenov J.D., Klochkova V.G., et al. High resolution spectroscopy of faint objects at the 6-m telescope // Bull. Spec. Astrophys. Observ. – 1998. – Vol. 44. – P. 127-131.
5. Панчук В.Е. Спектральный комплекс фокуса Нэсмита 6-м телескопа БТА. VII. Основной звездный спектрограф // Препринт САО. – 2001. – № 154. – С. 1-18.
6. Панчук В.Е., Ключкова В.Г., Юшкин М.В., Яковов Г.В., Верич Ю.Б. Техника спектрополяриметрии звезд на 6-метровом телескопе БТА. I. Спектрографы фокусов Нэсмита // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59. – С. 1018-1027.
7. Panchuk V.E., Klochkova V.G., Yushkin M.V. Results of Selected Stellar Spectroscopy Programs at the 6-m Telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences Performed with the NES Echelle Spectrograph. // Astrophysical Bulletin. – 2022. – Vol. 77, Iss. 1. – P. 84-93.
8. Юшкин М.В., Яковов Г.В., Верич Ю.Б., Емельянов Э.В., Фатхуллин Т.А., Ключкова В.Г., Панчук В.Е. Системы коррекции низкочастотных составляющих искажений волнового фронта как первый контур адаптивной оптики // Всероссийская научная конференция «Многоликая Вселенная: теория и наблюдения - 2022», САО РАН, п. Нижний Архыз, 23-27 мая 2022 г. (тезисы доклада).
9. Panchuk V., Verich Y., Klochkova V., Yushkin M., Yakopov G., Sergeev D. Spectrophotometric Support of Spectral Observations with the BTA Telescope // Physics and Evolution of Magnetic and Related Stars. Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia, 25-31 August 2014. ASP Conf. Ser. – 2015. – Vol. 494. – P. 337.
10. Панчук В.Е., Ключкова В.Г., Юшкин М.В., Яковов Г.В., Верич Ю.Б. Спектрополяриметрия звезд на 6-метровом телескопе БТА. II. Эшелле-спектрографы первичного фокуса // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 1. – С. 53-62.
11. Panchuk V.E., Klochkova V.G., Yushkin M.V., Yakopov G.V., Verich Yu.B., Sachkov M.E. Echellé Spectropolarimeter of the BTA Primary Focus: Purpose and Optical-Mechanical Construction // In “Stars: from collapse to collapse”. ASP Conf. Ser. – 2017. – Vol. 510. – P. 562-565.
12. Panchuk V.E., Klochkova V.G., Yushkin M.V., Sachkov M.E., Yakopov G.V., Verich Yu.B., Emelyanov E.V. A project of echellé spectropolarimeter for the primary focus of the 6-m BTA telescope // INASAN Science Reports, – 2020. – Vol. 5 (6). – P. 361-367.
13. Panchuk V.E., Chuntonov G.A., Naidenov I.D. Main stellar spectrograph of the 6-meter telescope. Analysis, reconstruction, and operation // Astrophysical Bulletin. – 2014. – Vol. 69, Issue 3. – P. 339-355.
14. Verich Y.B., Panchuk V.E., Yushkin M.V., Yakopov G.V. High-resolution BTA spectrograph auxiliary devices (functions and control) // INASAN Science Reports. – 2020. – Vol. 5 (6). – P. 320-321.
15. Верич Ю.Б., Яковов Г.В., Юшкин М.В., Панчук В.Е. Проект спектрографа высокого разрешения для 1-метрового телескопа САО. II. Система управления. Международная конференция "Настоящее и будущее малых и средних телескопов" SMT-2015 19-22 октября 2015 г. п. Нижний Архыз, КЧР, Россия: Тезисы докладов. – С. 29-31.
16. Sogoyan A.E., Yakopov G.V., Verich Yu.B., Emelyanov E.V., Sogoyan A.E., Yushkin M.V., Panchuk V.E. Control System for the High Resolution Fiber Spectrograph of the SAO RAS 1-m Telescope // In “Stars: from collapse to collapse”. ASP Conf. Ser. – 2017. – Vol. 510. – P. 554-555.
17. Панчук В.Е., Яковов М.В., Ключкова В.Г., Юшкин М.В. Калибровка спектров астрономических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – Т. 61, № 4. – С. 106-110.
18. Панчук В.Е., Ключкова В.Г., Сачков М.Е., Верич Ю.Б., Юшкин М.В., Яковов Г.В. Подвесной спектрограф скрещенной дисперсии. Международная конференция "Настоящее и будущее малых и средних телескопов" SMT-2015 19-22 октября 2015 г. п. Нижний Архыз, КЧР, Россия. Тезисы докладов. – С. 70.
19. Panchuk V.E., Verich Yu.B., Klochkova V.G., Sachkov M.E., Yushkin M.V., Yakopov G.V., Emelyanov E.V. Cassegrain Echellé Spectrograph // In “Stars: from collapse to collapse”. ASP Conf. Ser. – 2017. – Vol. 510. – P. 559-561.
20. Панчук В.Е., Ключкова В.Г., Комаров В.В., Марченко Д.В. Спектрограф скрещенной дисперсии для 10-дюймового телескопа. // Международная конференция "Настоящее и будущее малых и средних телескопов" SMT-2015 19-22 октября 2015 г. п. Нижний Архыз, КЧР, Россия: Тезисы докладов. – С. 69.
21. Панчук В.Е., Верич Ю.Б. Автоколлимационный дифракционный спектрограф // Международная конференция "Настоящее и будущее малых и средних телескопов" SMT-2015 19-22 октября 2015 г. п. Нижний Архыз, КЧР, Россия: Тезисы докладов. – С. 66-67.
22. <https://www.iau.org/public/images/detail/ann22007a/>.
23. Панчук В.Е., Ключкова В.Г. К проблеме наземных астрономических наблюдений с высоким спектральным разрешением // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных работ IX Всероссийской научной конференции, Нижний Архыз, 24–27 сентября 2019 года. – Нижний Архыз, 2019. – С. 176-180.

# Разработка картографического приложения для оптимального размещения объектов социальной инфраструктуры

Исаев Александр Викторович  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[alis@sfedu.ru](mailto:alis@sfedu.ru)

Калачев Дмитрий Петрович  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
[dpkalachev@sfedu.ru](mailto:dpkalachev@sfedu.ru)

**Аннотация.** Целью работы является разработка картографического приложения для решения задачи выбора оптимального размещения объектов социальной инфраструктуры на карте с учётом данных о населении, расположении существующих объектов и заданных весовых коэффициентов для критериев оптимальности. В работе представлены аналоги приложения, принцип работы приложения, а также описывается способ вычисления оптимального местоположения на карте с использованием сверток критериев оптимальности в многокритериальной оптимизации.

**Abstract.** The aim of the state is to develop a mapping application to solve the problem of choosing the optimal location of social infrastructure on the map, taking into account the data on the population, the location of existing facilities and given weighting coefficients for the optimality criteria. The paper presents the principle of the application, and describes how to calculate the optimal location on the map using the convolution of optimality criteria in multi-criteria optimization.

**Ключевые слова:** ГИС (Геоинформационные системы), системы поддержки принятия решения, оптимальное размещение объектов инфраструктуры, многокритериальная оптимизация.

**Keywords:** GIS, decision support systems, optimal infrastructure placement, multi-criteria optimization.

## I. ВВЕДЕНИЕ

**Объектом** данной работы являются объекты социальной инфраструктуры, **предметом** данной работы являются алгоритмы-свертки, используемые для оптимального размещения объектов на карте в ГИС-приложении.

В 2020 году государство ввело ряд мер, которые должны помочь малому и среднему бизнесу в сложных обстоятельствах. Сейчас действует федеральная и региональная поддержка. Программы господдержки малого и среднего бизнеса направлены прежде всего на отрасли, приоритетные для государства. В первую очередь помочь предоставляется с финансированием дела, которое будет полезным для вашего региона, области или даже конкретного города: например открытие аптеки, развитие растениеводства или туризма.

Разработанное приложение помогает бизнесмену оптимально разместить на карте города бизнес или администрации города найти оптимальное размещение нового объекта социальной инфраструктуры, проводя при этом конкурентный анализ и анализ населения.

Молодым семьям бывает непросто вставать на ноги. Далеко не каждая пара имеет собственное жильё и средства, чтобы обеспечить себя и будущих детей. Чтобы оказать содействие молодёжи, государство предоставляет поддержку в виде социальных выплат. При этом наблюдается тенденция к нехватке мест в детских садах. В ближайшее время планируется полностью закрыть дефицит мест в детских садах и яслях, осуществить это собираются за счёт строительства новых учреждений. Разработанное картографическое приложение может помочь проанализировать количество детей в городе и расположение детских садов, чтобы оптимально открыть новый частный детский сад.

Также приложение может помочь выгодно разместить предприятия бытового обслуживания: парикмахерские, мастерские, химчистки-прачечные, ателье, ломбарды, которые принадлежат индивидуальным предпринимателям.

Из-за пандемии всё больше компаний отказываются от офисной работы и начинают работать дистанционно, из-за чего люди стали меньше двигаться и потребность в открытии новых спортивных клубов становится еще более актуальной.

Для решения вышеописанных проблем, связанных с оптимальным размещением бизнеса на карте, было разработано данное картографическое приложение «Оптимум». Разработанная версия приложения позволяет оптимально размещать любые объекты социальной инфраструктуры по любым направлениям бизнеса.

Пространственное размещение объектов социальной сферы играет важную роль в организации различных экономических процессов, отвечая за миграционные потоки и движение трудовых ресурсов. В анализе учитывается пространственный фактор, отражаясь в основном в показателях доступности учреждений от мест проживания населения и численности населения на оп-

ределенную территорию. В настоящий период за рубежом активно развиваются методики по совершенствованию размещения объектов социальной инфраструктуры.

**Актуальность темы** обусловлена тем, что в России только с недавнего времени важность этого вопроса начинает осознаваться и становится понятно, насколько остра необходимость в определенных учреждениях социальной сферы с учетом расположения населенных пунктов и численности населения в них.

Данная причина обуславливает разработку специального картографического приложения, которое может помочь пользователю найти на карте оптимальное расположение объекта социальной инфраструктуры с учётом конкурентного анализа и анализа населения.

**Целью работы** является разработка картографического приложения для решения задачи выбора оптимального размещения бизнеса или нового объекта инфраструктуры на карте с учётом данных о населении, расположении существующих объектов инфраструктуры и заданных пользователем весовых коэффициентов для критериев оптимальности, использующихся при расчете.

Достижение поставленной цели требует решение следующих задач:

- проанализировать предметную область;
- провести анализ существующих аналогичных приложений, провести их сравнение, выделить достоинства и недостатки каждого аналога;
- выработать подробные требования к разрабатываемому приложению;
- проработать и реализовать пользовательский интерфейс приложения;
- выявить необходимый функционал и выполнить его программную реализацию;
- провести тестирование разработанного картографического приложения, написать тест-кейсы;
- написать руководство пользователя и составить отчетную документацию.

Для выполнения работы был использован следующий комплекс инструментальных средств:

- язык программирования C#;
- интегрированная среда разработки Visual Studio;
- программная платформа .NET Framework;
- библиотека GMap.NET, предоставляющая возможность работы пространственными данными.

Для решения задачи оптимального размещения объектов социальной инфраструктуры на карте было разработано картографическое приложение, с помощью которого пользователь может отображать на карте различные объекты, а также при визуализации карты изменять стили отображения объектов в зависимости от значений нескольких связанных с объектами атрибутов. Приложение позволяет проводить конкурентный анализ, а также анализ населения районов города. Для работы с приложением пользователю необходимо загрузить данные для анализа.

Пользователю предоставляется набор инструментов, обеспечивающих возможность отображения карты, выводимой информации об объекте инфраструктуры, языка подписей на карте, значков объектов.

Приложение помогает найти оптимальное место на карте для открытия бизнеса или нового объекта социальной инфраструктуры с учётом выбранных критериев.

## II. Существующие аналоги

Разработанное приложение имеет аналоги, для сравнительного анализа выбраны Maptive ([www.maptive.com](http://www.maptive.com)) и Mapbusinessonline (<https://www.mapbusinessonline.com>). Основным критерием выбора этих приложений является наличие функциональности поиска оптимального размещения объекта на карте. Были проанализированы достоинства и недостатки обоих упомянутых приложений и предоставленного в докладе. Итоги представлены табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ТАБЛИЦА СРАВНЕНИЯ С АНАЛОГАМИ

Критерий сравнения	Аналоги		
	<i>Maptive</i>	<i>Mapbusinessonline</i>	<i>Оптимум</i>
Обязательная регистрация	Да	Да	Нет
Расширенная визуализация бизнес-карты	Да	Да	Да
Возможность загрузки собственных данных	Да	Да	Да
Наличие информации о населении	Нет	Да	Да
Работа в России	Нет	Нет	Да
Выбор поставщиков карт	Да	Нет	Да
Возможность экспорта карты	Да	Да	Да
Поиск оптимального размещения объектов на карте	Да	Да	Да
Картографический анализ рынка, конкурентный анализ	Нет	Да	Да
Хранение данных в электронных таблицах Excel	Да	Да	Да

Картографический веб-сервис Maptive позволяет изменить стиль отображения города в зависимости от значений определенного атрибута. Также данный сервис позволяет искать оптимальное размещение бизнеса на карте. Данный сервис представлен на рис. 1.

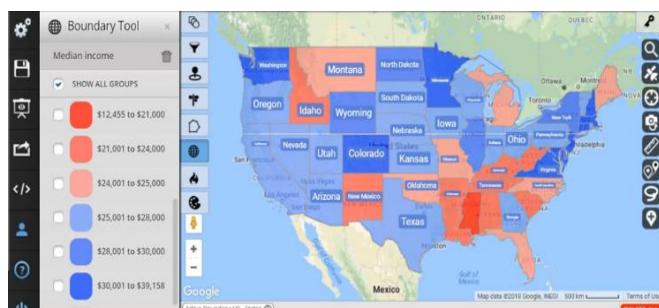


Рис. 1. Визуализация данных в сервисе Maptive

Десктопный сервис Mapbusinessonline позволяет помимо визуализации городов и отдельных районов города также находить оптимальное размещение различных

объектов на карте с учётом конкурентного анализа и данных о населении. Пример основного окна сервиса представлен на рис. 2.

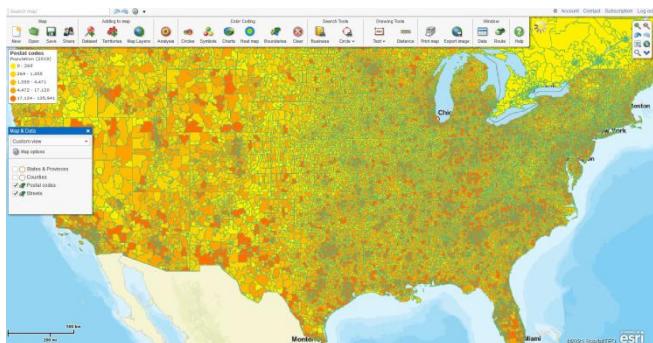


Рис. 2. Визуализация данных в сервисе Mapbusinessonline

### III. РАЗРАБОТКА КАРТОГРАФИЧЕСКОГО СЕРВИСА

Для решения задачи оптимального размещения объектов социальной инфраструктуры на карте было разработано картографическое приложение, с помощью которого пользователь может отображать на карте объекты социальной инфраструктуры, а также при визуализации карты изменять стили отображения объектов в зависимости от значений нескольких связанных с объектами атрибутов. Приложение позволяет проводить конкурентный анализ, а также анализ населения районов города.

Пользователю предоставляется набор инструментов, обеспечивающих возможность отображения карты, выводимой информации об объекте инфраструктуры, языка подписей на карте, значков объектов.

Приложение помогает найти оптимальное место на карте для открытия бизнеса с учётом выбранных критериев. Кроме основного функционала приложение позволяет находить недостающее количество объектов инфраструктуры в городе на душу населения, визуализировать данные. Пользователь самостоятельно выбирает объект инфраструктуры для работы, иконку, количество критериев оптимизации, весовые коэффициенты.

На рис. 3 представлено главное окно разработанного приложения.

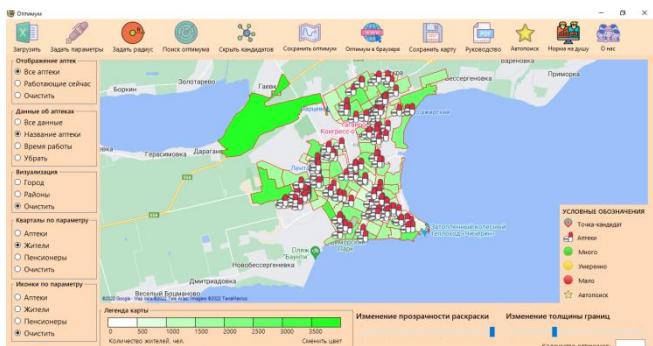


Рис. 3. Главное окно разработанного приложения

### IV. ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРИЛОЖЕНИЯ

Работа в приложении состоит из нескольких этапов:

1. На первом этапе происходит загрузка данных. Пользователь должен написать название объекта инфраструктуры, загрузить значок для отображения на карте

этих объектов, задать количество критериев оптимальности, названия критериев, а также загрузить файл с информацией о рассматриваемой территории на карте.

2. На втором этапе происходит визуализация данных. Пользователь может воспользоваться встроенными инструментами отображения или настроить свой стиль визуализации для просмотра расположения всех объектов инфраструктуры. В приложении можно проводить точечную и площадную раскраску по любым указанным при входе атрибутам.

3. Третий этап – анализ вариантов размещения. Пользователь размещает на карте маркеры, на месте которых он считает будет оптимально разместить новый объект инфраструктуры, а также задает радиус буферной зоны для подсчета в заданной области количества других объектов инфраструктуры и связанными с ними атрибутами.

4. На четвертом этапе происходит поиск оптимального размещения объекта. Пользователь задает приоритеты критериев, и приложение начинает анализировать данные, в итоге оставляя на карте только оптимальное с точки зрения выбранных критериев место для открытия нового объекта инфраструктуры.

Также в приложении реализован автоматический поиск N требуемых оптимальных точек. В первом варианте приложение находит одну оптимальную точку из нескольких установленных пользователем. Во втором случае пользователь задает весовые коэффициенты и задает количество искомых оптимальных точек, алгоритм анализирует всю карту и по итогу отображает пользователю N самых оптимальных точек для открытия нового бизнеса или объекта социальной инфраструктуры с учетом загруженных данных о городе и заданных весовых коэффициентов.

### V. РАСЧЁТ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ

Задача поиска оптимального расположения объекта на карте с учетом некоторых критериев относится к задачам многокритериальной оптимизации. В рассматриваемом случае данные критерии пользователь будет вводить при входе в приложение. Максимально можно задать семь критериев оптимальности. Должен ли критерий минимизироваться или максимизироваться задает пользователь при входе в приложение. За редким исключением при свертке критериев направление оптимизации всех частных критериев одинаково. Следует иметь в виду, что глобальный критерий максимизируется. Соответственно, и частные критерии должны иметь это же направление оптимизации.

Первым делом для поиска оптимального размещения необходимо выполнить нормирование частных критериев, осуществив их приведение к относительным единицам – к интервалу [0,1]. Нормализация критериев выполняется по формуле:

$$f_i^{norm}(X) = \frac{f_i(X) - f_i^{min}}{f_i^{max} - f_i^{min}}. \quad (1)$$

Для поиска лучшей альтернативы необходимо воспользоваться свёртками. При свертке каждому частному критерию обязательно назначается приоритет, который называется весом. Веса критериев задаются пользователе-

лем и при использовании свёрток считаются известными заранее [1]. При задании весов должно выполняться условие нормировки весов:

$$0 \leq w_j \leq 1, \sum_{j=1}^m w_j = 1. \quad (2)$$

После нормирования свёртки начинают поиск лучшей альтернативы – маркеров, размещенных пользователем на карте. В приложении используется семь свёрток – линейная, мультиплекативная, максиминная, агрегирования, а также три свёртки на основе метрик Чебышева, Хемминга и Евклида.

Линейная свёртка – простейшая и наиболее используемая функция свёртки:

$$F(X) = \sum_{j=1}^m w_j f_j(X) \rightarrow \max. \quad (3)$$

Мультиплекативный критерий приводит к тому, что общее качество решения равно нулю, если хотя бы один частный критерий равен нулю. Достоинство свёртки в том, что частные критерии не требуют нормировки:

$$F(X) = \prod_{j=1}^m w_j f_j(X) \rightarrow \max. \quad (4)$$

Максимин – оптимальное решение обеспечивает получение наибольшей эффективности в худших условиях:

$$F(X) = \min_{\substack{X \in D \\ j=\overline{1,m}}} f_j(X) \rightarrow \max. \quad (5)$$

Свертка на основе идеальной точки. Идеальной точкой (альтернативой) называется такая точка  $\vec{f}^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_m^*)$  целевого пространства, которая одновременно обладает наилучшими оценками по всем частным критериям.

Например, ее координаты можно найти из решения  $m$  одномерных оптимизационных задач, в которых все частные критерии максимизируются

$$f_j^* = \max_{\substack{X \in D \\ j=\overline{1,m}}} f_j(X). \quad (6)$$

Если достижимое множество (вектор критериев) нормализовано и оценки приведены к интервалу  $[0,1]$ , то  $\vec{f}^* = (1, 1, \dots, 1)$ . Как правило идеальная точка не принадлежит достижимому множеству, в противном случае многокритериальная задача имеет тривиальное решение: утопия становится реальностью.

Глобальный критерий имеет вид:

$$F(X) = \rho(X). \quad (7)$$

Для определения свертки необходимо определить – метрику, т.е. функцию, показывающую расстояние между текущей альтернативой и идеальной. Отметим, что для свёртки на основе идеальной точки можно выполнить построение идеальной точки и с учётом исходного направления каждого частного критерия:

$$f_j^* = \max_{\substack{X \in D \\ j=\overline{1,k}}} f_j(X). \quad (8)$$

При этом нормализация локального критерия также должна выполняться с учётом направления данного критерия – оценки приводятся к интервалу  $[0, 1]$ . То есть для частного критерия, который максимизируется, в вектор

идеальной точки заносится наибольшее значение. А для частного критерия, который минимизируется, в вектор идеальной точки заносится наименьшее значение.

Метрика Чебышева:

$$\rho(X) = \max_{j=1,m} [w_j \cdot |f_j^* - f_j(X)|]. \quad (9)$$

Метрика Хемминга:

$$\rho(X) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot |f_j^* - f_j(X)|. \quad (10)$$

Метрика Евклида:

$$\rho(X) = \left( \sum_{j=1}^m w_j \cdot (f_j^* - f_j(X))^2 \right)^{1/2}. \quad (11)$$

Свертка агрегирования (осреднения):

$$F(X) = \left[ \sum_{j=1}^m (w_j f_j(X))^p \right]^{\frac{1}{p}} \rightarrow \max, \quad p \neq 0. \quad (12)$$

Здесь показатель степени  $p$  отражает допустимую степень компенсации малых значений одними равнозначными частными критериями большими значениями других критериями (чем больше  $p$ , тем большая степень возможной компенсации).

При  $p = -\infty$  не допускается никакая компенсация.

Если  $p \rightarrow 0$  (требуется обеспечение примерно одинаковых уровней частных критерии), то свертка вырождается в мультиплекативную, при  $p = 1$  – в аддитивную.

## VII. Принятие решения

После того, как каждая свертка выявила своего оптимального кандидата происходит процесс принятия решения – какую точку отобразить пользователю как оптимальную. Для этого необходимо узнать, согласны ли все свертки между собой или есть между ними разногласия.

Рассмотрим процесс принятия решения на примере трёх свёрток. Пусть линейная свертка  $S_1$ , мультиплекативная свертка  $S_2$ , максиминная свертка  $S_3$ , альтернатива выбранная  $S_1 - a_1$ , альтернатива выбранная  $S_2 - a_2$ , альтернатива выбранная  $S_3 - a_3$ . Принятие решения должно выполнять следующим образом:

1. Если  $a_1 = a_2 = a_3$ , то назначить оптимальной альтернативу  $a_1$ .
2. Если найденные альтернативы совпали у двух свёрток из трех, например у  $S_1$  и  $S_2$ ,  $S_1$  и  $S_3$  или  $S_2$  и  $S_3$ , то назначить оптимальной альтернативу, которую выбрали две свертки.
3. Если  $a_1 \neq a_2 \neq a_3$ , то есть все свертки выбрали разные альтернативы, то из трех лучших кандидатов, надо выбрать ту, в которой приоритетный частный критерий лучше остальных соответствует заданным весовым коэффициентам.

После определения и визуализации оптимальной альтернативы пользователь может продолжить сеанс размещения маркеров на карте и повторном поиске оптимальной точки.

## VII. Взвешенные диаграммы Вороного

Как уже говорилось ранее, разработанное приложение позволяет производить площадку раскраску геоинформационных данных для визуального анализа загруженной в приложение информации. Для площадной раскраски карты по атрибутам используются взвешенные диаграммы Вороного.

В российской практике редко применяются математические инструменты для оптимизации размещения учреждений социальной инфраструктуры. В данном приложении используется аппарат взвешенных диаграмм Вороного для изучения обеспеченности населения заданными объектами социальной инфраструктуры и изучения населения города.

Действующая в русских аналогах методика размещения социальных учреждений исходит из иерархического построения и соответствия некоторой неизменной структуре административного управления, не учитывая сложившуюся пространственную систему расселения.

Основная идея предлагаемой методики состоит в том, чтобы разделение территории по учреждениям социальной сферы максимально совпадало с ее зонированием по населению. Следовательно, разные зоны имеют разные размеры, т.е. каждый участок обладает определенным весом.

Для зонирования по численности этот вес определяется числом жителей, проживающих на определенной территории. Для определения веса социальных учреждений предлагается использовать взвешенные диаграммы Вороного. Зоны обслуживания учреждений социальной сферы определяются так же, как и зоны по численности населения [2].

Каждый населенный пункт имеет свой вес на каждой из диаграмм Вороного. Так как в разрабатываемом приложении используется несколько критериев (количество задает пользователь), то каждый квартал города имеет по несколько полигонов Вороного. На рис. 4 представлен полYGON взвешенной диаграммы Вороного по численности жителей в Таганроге.

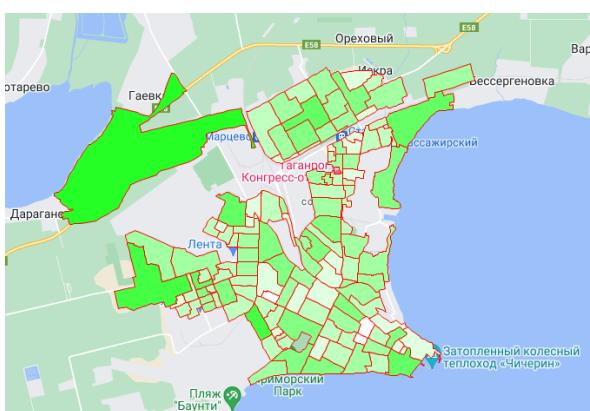


Рис. 4. Взвешенные диаграммы Вороного на примере города Таганрога

## VIII. ПОИСК НЕХВАТКИ ОБЪЕКТОВ НА ДУШУ НАСЕЛЕНИЯ

Разработанное приложение помимо средств визуализации и поиска оптимальной точки предоставляет еще ряд полезных инструментов таких, как экспорт карты, замена поставщика карты, автоматический поиск оптимально точки.

Одной из дополнительных функций приложения является возможность поиска объектов инфраструктуры на душу населения. Для реализации данной функции было разработано окно для анализа объектов социальной инфраструктуры города и их соответствия нормам на душу населения. На рис. 5 представлено разработанное окно. На данном окне пользователь задает весовые коэффициенты критериев оптимальности; при помощи ползунка задает радиус буферной зоны в метрах; указывает норму объектов социальной инфраструктуры на некоторое количество населения.

Приложение анализирует население города и количество рассматриваемых объектов инфраструктуры, а также заданную пользователем норму. Если в городе не хватает по нормам N объектов, то приложение отобразит N самых оптимальных точек для открытия нового бизнеса. Если в городе норма выполнена и не превышает 120 %, то приложение посоветует пользователю 10 лучших точек, но предупредив, что в городе норма выполнена. Если в городе норма выполнена и превышает 120 %, приложение по желанию пользователя покажет 10 лучших точек, но обязательно предупредит, что данный бизнес в городе является невыгодным для открытия.

На рис. 5 представлены результаты работы данной функции приложения. На данном окне пользователь может задавать веса важности, радиус буферной зоны, норму на душу населения, включать и выключать отображение найденных точек, прочитать руководство пользователя, сохранить карту, а также включить и отключить отображение объектов инфраструктуры.

В верхней части окна приложение дает краткое пояснение к анализу города: в городе не хватает N объектов инфраструктуры, в городе хватает объектов инфраструктуры, но открыть еще несколько будет выгодно; в городе хватает объектов инфраструктуры и бизнес будет невыгодный.

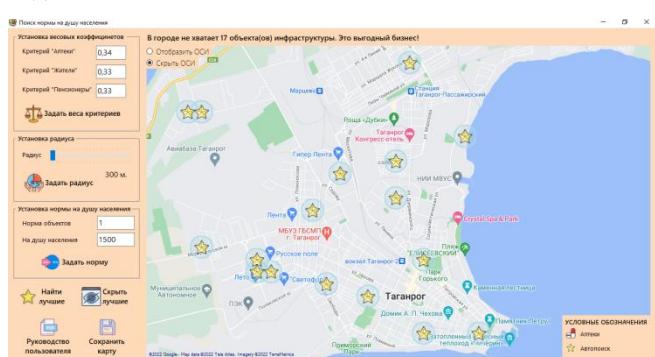


Рис. 5. Поиск нехватки объектов инфраструктуры при заданной норме на душу населения

## IX. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрабатываемое приложение представляет собой геоинформационную систему поддержки принятия решения при оптимальном размещении нового объекта инфраструктуры, использующую в качестве математического аппарата – свертки критериев многокритериальной оптимизации.

Анализ трендов научных исследований по данной теме показывают рост интереса в последние 6 лет: наблюдается рост числа публикаций и цитирований.

Область геоинформационных систем и поиска оптимального размещения объектов на карте активно разрабатывается в ЮФУ, опубликовано большое количество статей по этой теме. В частности, большое количество работ на данную тематику опубликовано специалистами Института компьютерных технологий и информационной безопасности.

Данное картографическое приложение было разработано в рамках выпускной квалификационной работы и позволяло оптимально размещать на карте только аптечные пункты в городе Таганроге, работая лишь с тремя критериями.

В рамках магистерской диссертации была произведена модификация разработанного приложения, что позволило использовать данное приложение в других городах России для открытия различных объектов инфраструктуры.

При определении оптимального места для будущей точки продаж удобно использовать географические информационные системы. Такие информационные систе-

мы широко распространены за рубежом и уже стали доступны Москве. ГИС сочетают географические карты, представленные в цифровом виде, и основные данные по территориям [2].

Таким образом, программное обеспечение ГИС позволяет розничным торговцам быстро оценивать преимущества и недостатки различных вариантов расположения своего бизнеса и просматривать полученные данные. В России на данный момент уже используются такие приложения, но в более крупных городах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Родзин, С.И. Теория принятия решений: Конспект лекций.  
– URL: <https://docplayer.ru/77707193-Teoriya-prinyatiya-resheniy.html>  
(дата обращения: 11.08.2022).
2. Лопаткина А.Е. Размещение объектов социальной инфраструктуры: зарубежный опыт и возможности для Российской практики.  
– URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razmeshchenie-obektov-sotsialnoy-infrastruktury-zarubezhnyy-opyt-i-vozmozhnosti-dlya-rossiyskoy-praktiki>  
(дата обращения: 13.08.2022).

## Секция VII

# ТЕНДЕНЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

DOI: 10.18522/syssyn-2022-76

## Подготовка инженеров: цели и концепции

Непомнящий Анатолий Владимирович  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*neperomnyashchiy@sfedu.ru*

**Аннотация.** Цель работы – рассмотреть, для развития инженерной деятельности, основные аспекты проблемы подготовки инженерных кадров в современном мире: от этимологии, целей и концепций, до основных способов, методов и средств её реализации. Показано, что в современном мире существуют две фундаментальных концепций – интеграции и дифференциации сущего, – отображающиеся во всех сферах человеческого бытия, а рост качества инженерного образования может быть достигнут только на пути интеграции знания.

**Abstract.** The purpose of the work is to consider, for the development of engineering, the main aspects of the engineering training problem: from etymology, goals and concepts, to the methods and means of its implementation. It has been shown that in the modern world there are two fundamental concepts - integration and differentiation of existence - appearing in all spheres of human being, and the growth of the engineering education quality can be achieved only by integral knowledge.

**Ключевые слова:** инженерная подготовка, методология, цели, концепции, интегральное видение, развитие.

**Keywords:** engineering training, methodology, goals, concepts, integral vision, development.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения качества подготовки инженерных кадров возникает вследствие неадекватной методологии, используемой при её планировании и реализации. Так, например, государственные стандарты инженерной подготовки содержат в себе требования к вузам обеспечить *формирование* тех или иных компетенций. Такое требование может быть сформулировано только в системе классической науки и её объективно ориентированной методологии, базирующейся на представлении о том, что в природе ничего, кроме субстанции вещества, не существует, откуда и парадигма классической науки – «закон сохранения массы вещества во вселенной».

А поскольку вещество всегда имеет объективно регистрируемую форму, то и все его свойства, как следствие, должны быть объективно регистрируемы, т.е. иметь объективно регистрируемую форму, которую можно изменять (формировать) и отслеживать объективными средствами результат такого формирования. Так появились в классической науке представления и о человеке, как об объекте, который конечен, рождается «чистым листом», на котором воспитатели «пишут свою историю», формируя те или иные его свойства, особенности и компетенции. Так появились и современные рейтинги, и ЕГЭ, и цифровые образовательные среды, и прочие классические «инновации», уничтожающие до уровня объекта человека, созданного Творцом «по образу и подобию Своему».

В связи с этим сам собой возникает вопрос: «Почему погасшая более ста лет назад «звезда» (парадигма) классической науки многим руководителям системы образования, и не только в нашей стране, но и во всем мире, до сих пор служит путеводным маяком?» Маяком, указующим путь в небытие. И это происходит в настоящее время, во время расцвета естественнонаучной мысли, во время постнеклассической науки и разработки компьютеров, управляемых человеческой мыслью, во время потрясающих экспериментов, позволяющих понять бесконечные возможности человеческого сознания и его когнитивных способностей. Ответ на этот вопрос находится в области целей образования и концепций их достижения.

### II. ЦЕЛИ И КОНЦЕПЦИИ ОБРАЗОВАНИЯ

Как и всё остальное в этом мире, целевые структуры любой системы управления иерархичны. Следуя дедуктивному принципу в познании и поднимаясь по этой иерархии в самый верх её планетарной структуры, мы неизбежно доходим до единой цели, свойственной любой системе управления: от системы управления одним человеком, до системы управления всем человечеством в целом. Эта цель – познание истины, – поскольку толь-

ко при её достижении исчезает неопределенность в процессе принятия решений, т.е. исчезает борьба гипотез, вызываемая извечно существующей информационной недостаточностью и ограниченностью сенсорных систем объективного восприятия мира человеком [1], на которые только и ориентирована когнитивная наука в её классическом варианте.

Целей второго уровня в существовании любой системы всего лишь две: развитие (повышение структурной и элементной сложности) и деградация – снижение внутренней сложности. Третьего (неизменного во времени состояния) не существует, поскольку мир находится в непрерывном движении, а значит точка отсчёта относительна, и она находится в непрерывном движении. На этом уровне иерархии целей мы и остановимся, поскольку на данном этапе рассмотрения важна только картина в целом, не затенённая мелочами, в которых согласно народной мудрости и кроется «дьявол», в нашем случае – ошибки в принятии решений.

Естественно предположить, что и концепций реализации этих двух целей тоже может быть только две, что вытекает из данного выше определения состояний развития и деградации любой системы. И, на самом деле, повышение сложности всегда связано с концепцией и процессами единения, (интеграции) тогда как снижение сложности любой системы всегда достигается путём разобщения, разделения, дифференциации.

Ни наука, ни системы социального воспроизведения, главной из которых после семьи и детства является система образования, не могут остаться в стороне от этих двух концепций и избежать их влияния на свою жизнь и деятельность. Естественно, всегда существовали и существуют управленцы разного социального уровня, которые являются носителями, провозвестниками, проводниками, и реализаторами этих двух концепций, примеров чему великое множество. Хотя, казалось бы, с позиции «здравого» ума, что приверженцев деградации вообще не должно быть в природе. Но на самом деле это не так, и целесообразность существования такого положения дел разъяснил духовный лидер Индии, воплощённый Аватар Бхагаван Сатья Сай Баба в своих выступлениях и публикациях [2].

Он пояснял, что Творец всего сущего проявляется в мире тринитарно, в виде трёх сил – силы созидания, силы сохранения созданного и силы растворения (разрушения) созданного. Задача последней – тестировать созданное методом искушения на предмет определения уязвимых мест в структуре созданного, провоцирующих нарушение его системной устойчивости. Если что-либо из созданного удаётся сбить с пути эволюционного развития, значит оно не может в этом развитии участвовать, и его необходимо либо усовершенствовать, либо «расторвать», дабы заведомо ущербное не плодилось.

Философы классической школы, вследствие своего дихотомического мышления, свойственного классической науке и философии, этого не могли понять и ввели в обращение тезис о единстве и борьбе противоположностей. На самом деле эти противоположности – силы сохранения созданного и силы растворения созданного – не сражаются друг с другом, а взаимодействуют, а еще точнее сказать – сотрудничают, обеспечивая эволюци-

онное развитие всего сущего, которое возможно только в процессе преодоления препятствий, как раз и порождаемых силами растворения.

Институты западных конфессий, работая в tandemе с классической наукой и философией, не смогли отойти от докторатов классики и придумали миф о существовании сил света и тьмы, опять-таки сражающихся друг с другом. И на определенном этапе развития человечества эта «страшилка» в виде дьявола и его пособников (бесов) была необходима, как был необходим такому человеку и сам страх, часто спасающий человека от попытки реализации безумных идей и поступков, угрожающих его существованию и развитию.

На самом деле тривиальная логика говорит о том, что, если Бог (Создатель, Аллах, Творец всего сущего ...) создал именно всё сущее, то он создал и дьявола, о чём и говорит Сатья Сай Баба, называя все три силы именно манифестациями Бога. Эти три силы присутствуют во всём, поэтому и человеческое тело, если его постоянно не тренировать и не совершенствовать, активизируя в себе силы сохранения, подпадает под влияние сил растворения (энтропии) и со временем умирает, давая возможность бессмертному «челю» (ученику) двигаться дальше из века в век [3, 4] в других формах существования. На земле существуют естествоиспытатели, которые живут в одном теле тысячелетиями, исследуя возможности осознанного управления своими внутренними силами растворения и сохранения. Но «среднестатистическому» человеку Творцом дарована в одном теле короткая жизнь и способность забывать свои прошлые жизни, дабы он смог, со временем, научиться не защищаться на результатах предшествующего опыта и понять все прелести жить в настоящем моменте «здесь и сейчас». Как только человек этого достигает, он, тем самым, открывает самому себе способность осознанно путешествовать по своему предшествующему опыту. Методология такого осознания достаточно подробно описана в религиях «чистого опыта». В буддизме это состояние «нирваны», в ведических традициях это состояние «ведание Ра» (сокращённо «вера»), в западных практиках, относящихся к трансперсональной психологии – это состояние внетелесного опыта, рождения заново (rebirthing) и др. [5, 6].

На основе сказанного выше легко понять всё происходящее в настоящее время в системе образования и, в частности, в системе подготовки инженерных кадров, в которой даже этимология слова «инженер» не рассматривается и со студентами не обсуждается, поскольку принято считать, что это всем досконально известно, а кому нет, его можно отослать в Интернет, за всем известными разъяснениями. И это тоже результат активной работы сил растворения, сотрудники которой открыто «на камеру» говорят о том, что народу нельзя давать хорошее образование, поскольку тогда таким народом будет трудно управлять, и они (молодёжь и народ) будут их свергать каждые десять лет [7].

Возникает известное противоречие между задачей сохранения суверенности каждой страны, без которой невозможно сохранение на Земле культурного многообразия, и которая достигается только средствами образования высокого уровня (концепция развития и единения), и задачей удержания власти экономическими эли-

тами, которые следуют совету Н. Макиавелли «разделяй и властвуй», реализуя концепцию торможения развития масс средствами дифференциации образования, а точнее путем уничтожения собственно образования, как системы трансляции новым поколениям интегральных образов действительности, и заменой её системой узкопрофильной профессиональной подготовки, на выходе которой мир получает специалистов «глубинного бурения» (А.А. Колесников), которые ничего не видят во-круг себя и считают, что всё необходимое можно обнаружить только на глубине, если бурить в той точке, где они в данный момент находятся.

Естественно, в мире существуют и учреждения интегрального образования, среди которых необходимо отметить своего рода эталонный вариант истинного учреждения образования – Интегральный университет Индии, – созданию которого «руками и ногами человечьими» Бхагаван Сатья Сай Баба посвятил 35 лет своей жизни [8], вследствие того, что главной проблемой его организации была не экономическая, а именно гуманистическая. Нужно было подготовить управленческие и преподавательские кадры, поскольку в тринитарной структуре любого проекта – «идея – кадры – ресурсы» ни одна из его составляющих не может отсутствовать или быть ущербной по отношению к другим.

Главным концептуальным отличием Интегрального университета Индии от других подобных университетов является примат общекультурной и этической подготовки студентов на первых курсах обучения. Бхагаван говорил студентам и преподавателям, что стать профильным специалистом очень просто. Главное при этом осться человеком, а человеческий строй психики появляется у людей только тогда, когда они изучают и безошибочно следуют законам этики общения с другими и этики общения с собой. Но, в первую очередь, человек должен познать, понять и применять этические правила общения с другими, на что обращал внимание ещё Патанджали, в традиции которого это достаточно подробно прописано и апробировано опытом тысячелетий.

Справедливость и необходимость такого подхода нам подсказывает жизнь. Сначала решается задача единения с миром, потом приходит всё остальное само по себе, в виде «побочного» результата этого единения. Автор знаком с инженером мирового уровня, у которого базовое и единственное официальное образование – ветеринарный техникум, но который, живя и работая в деревне, получил более ста международных патентов на изобретения в различных областях науки и техники – от нано технологий, до беспилотных аппаратов и систем глубокой очистки токсичных отходов жизнедеятельности мегаполисов. Чтобы понять, как человек достигает такого уровня творческой инженерной деятельности, необходимо обратиться к этимологии понятия «инженер».

### III. ИНЖЕНЕР КАК ИЗОБРЕТАТЕЛЬ

Как известно, в переводе с французского или с латыни слово инженер означает «изобретатель». Для того, чтобы понять кто это, исходя из русского языка, надо всё поставить на свои места. Получим: изобретатель – это «изобретатель», или, для упрощения восприятия, – «обратитель из». То есть, – это человек, который способен обретать что-либо из чего-либо. Слово «из» прово-

цирует вопрос «откуда?». Слово «обратитель» приводит к вопросу – «как?». Ответы на эти вопросы должны содержать в себе пути решения проблемы подготовки инженерных кадров, которых, в соответствии с двумя обозначенными целями и двумя концепциями, тоже теоретически должно быть два. Найти эти ответы без понимания, что есть человек и каковы его системы восприятия мира, – не представляется возможным без попадания в ситуацию «Поди туда, не знаю куда! Принеси то, не знаю что!». Подробный ответ на эти вопросы занимает более 500 страниц текста, которые опубликованы и находятся в открытом доступе [1]. Здесь мы приведём лишь необходимые модели человека и вытекающие из них выводы, позволяющие дать ответы на поставленные вопросы.

Итак, слово «человек» состоит из двух достаточно древних слов «чело» (в некоторых восточных языках пишется «чела») – «ученик», и «век» – один из бесконечных этапов обучения этого ученика [3, 4]. Лингвист из Таганрога Л. Тимонина на основании изучения многих языков мира предложила более развернутую трактовку этого понятия: «человек» – есть существо, посланное солнцем на Землю для самосовершенствования. Обе трактовки не противоречат друг другу: первая – обобщённая; вторая – более конкретизированная.

Это существо имеет много других определений: «Искра Бога внутри каждого из нас» (христианское определение); «индивидуальность» (квантовая философия) – Искра Бога, которая обрела свой уникальный, индивидуальный опыт существования во множестве различных форм (тел), проявляясь в виде самых различных личностей (личин, масок); «сознание» (знание, соединяющее всё в единую цельность) – то, из чего всё происходит (буддизм)…

Чело бессмертно, смертны только его инструменты – личность и телесные формы существования. Отсюда и поныне существующие, примитивные представления классической науки о человеке как о телесном существе, конечном во времени и пространстве. С таким же успехом можно отождествлять плотника с его топором и хирурга с его скальпелем. Но и ныне существуют в науке «Докинзы» [9], которые считают Бога иллюзией, а человека продуктом стохастических (неуправляемых) мутаций. Они до сих пор не знают о существовании в неклассической науке второго начала термодинамики, согласно которому «неуправляемые материальные системы стремятся под воздействием энтропии только к хаосу (непрерывному снижению структурной сложности), но отнюдь не к гармонии и эволюции, что непосредственно и доказывает существование Создателя всего сущего, проявляющегося в виде трёх вышеуказанных сил, каждая из которых имеет свою иерархию зриемых (сенсорными системами человека) или незримых существ, обитающих повсюду.

Каждая индивидуальность бесконечна по своему информационному содержанию, поскольку она есть голограммическая копия Бога (его эманация), почему и сказано, что «Бог создал человека по образу и подобию Своему», т.е. – творцом. И, рассматривая основы и закономерности инженерного творчества, это положение нам необходимо никогда не забывать и учитывать, ибо в нём и содержатся ответы на поставленные вопросы.

Сознание человека, как его информационная, управляющая система, структурировано, как и все полевые и квантовые структуры. Оно не имеет границ, но имеет функционально определённую структуру, модель которой показана на рис. 1 [11].



Рис. 1. Трехуровневая модель структуры сознания

В этой структуре периферическое сознание функционально направлено на обеспечение деятельности личности. Поскольку личность является временным инструментом чela, её сознание ограничено в информационном плане. Оно у всех личностей разное и по информационному содержанию, и по объёму в силу того, что каждая личность функционально ориентирована на выполнение той жизненной задачи, которую ей определяет индивидуальность. Дабы личность не отвлекалась от этой своей конкретной программы, сознание нави и сублиминальная зона без прохождения специальных практик самосовершенствования для неё недоступны. Отсюда и заблуждения классической науки по поводу одной жизни человека, и отождествление этой части сознания с оперативной памятью человека, и утверждение о том, что сознание – есть продукт деятельности мозга, – всё по той же логике – плотник является продуктом деятельности топора.

Поскольку личность, хотя и является изумительным продуктом творчества Создателя, всё же имеет информационные ограничения, связанные с тем, что слабо развитая личность познаёт осознанно мир только с помощью сенсорных систем, обладающих чудовищно малой полосой пропускания. Принятие такой личностью решений всегда происходит в условиях неопределенности из-за недостатка необходимой информации и избытка мотивов – множества одновременно активных и иерархически не упорядоченных побудителей к действию. В этих условиях личность принимает множество ошибочных решений, что затормаживает её активность согласно причинно-процессно-следственному закону (закону кармы), дабы она не привлекла к себе слишком много негативно ориентированных для неё событий. В связи с этим надо никогда не забывать, что всё, что с нами происходит, мы создаём себе сами.

Дабы как-то смягчить ситуацию, связанную с множеством ошибок, допускаемых личностью, человеку дарованы сновидения и соответствующее «сознание нави», находясь в котором человек может быстро решить накопившиеся за день проблемы, поскольку сознание нави обладает несравненно большей информационной ёмкостью и в нём присутствуют сознания сразу всех действующих лиц, с которыми взаимодействовала личность в яви. Поэтому, есть большой шанс за одну ночь вымолить прощение у всех, кому нанесён вред

ошибочно принятыми решениями. А те, кто не обременил себя ошибками, как раз и используют эту структуру своего сознания в качестве источника, «из» которого они и «обретают» множество нового, неизвестного и недоступного обычным людям. Уходя в сновидения для такого обретения, необходимо сохранять осознанность [10]. В мировой практике осознаваемого доступа в зону нави издревле разработаны и широко используются ныне различными службами методы, методики и средства обретения информации от человеческих сообществ всей планеты и всего мира. Эта методология обрела широкую известность для интересующихся и изобретателей благодаря исследованиям в области трансперсональной (надличностной) психологии [5].

Но самым желанным источником для осознанно обретающих новое в контексте концепции единения, естественно, является мир Прави, мир Богов, откуда и произошло слово «православие»,искажённое от древнего арийского «Правъ славие» – прославление Мира Богов. И те, кто прославлял этот мир бесконечного по информационной ёмкости сознания, делали это не из догматических ритуальных соображений, а из благодарности за полученное «просветление», за состояние будды (позвавшего), которое в буддизме обретается в движении к нирване, что у наших пращуров означало «введение Ра», т.е. пребывание в Боге Ра, в котором есть вся информация обо всём: о прошлом опыте вселенского разума; его настоящем состоянии и творчестве; о будущих открытиях и изобретениях, во всей их бесконечной многообразности. И всё это так и есть потому, что те разумные существа, которые создают планеты, зажигают и гасят звёзды, дают жизнь новым галактикам, уже давно прошли все наши младенческие этапы развития, уже бесконечно давно изобрели всё то, что только актуализируется в человеческом сознании в виде будущих достижений, изобретений и открытий и уже давно разместили свои находки «в открытом доступе» во вселенском сознании для тех, кто способен вместить эту информацию в своё сознание без причинения вреда себе, окружающим и миру, в целом.

Итак, мы рассмотрели структуру человеческого сознания, как основного источника, «из» которого можно обрести бесконечное количество качественно различной информации, являющей собой предмет изобретательской деятельности. Это путь, соответствующий концепции интеграции, единения с миром, пути человеческого эволюционного развития. И это именно так, поскольку человек своим сознанием интегрирован в сознание мицроздания, и, если он это понимает и не отрицаёт, ему со временем в качестве результата его самосовершенствования и движения на пути к своей индивидуальности, к Искре Бога в себе открываются возможности, соответствующие его достижениям в саморазвитии. Именно поэтому никто и никогда не может «сформировать» в другом человеке никакие компетенции, какие бы стандарты к этому не призывали и не обязывали бы по невежеству или злому умыслу, суть которого – отвлечение человека от самого себя и замыкание его на объектах симуляции мира действительности. Разместив свое периферическое сознание в мире гаджетов и симуляций, человек никогда не сможет обрести состояние просветления (состояние «вера»), т.е. не сможет осознанно войти в контакт с главным источником инноваций (субли-

миальной зоной своего сознания), с Богом в себе, что и является вожделенной мечтой сил растворения, активно оцифровывающих мир человеческого бытия, а главное – систему образования, как одного из важнейших аспектов человеческого воспроизведения.

Прекрасно понимая, что происходит вследствие их разрушительных усилий, они на всех форумах заявляют, что сейчас главное сформировать у человека с помощью узкопрофессиональной подготовки навыки – не требующие усилий ума и разума автоматизмы. О тринитарной структуре именно образования – «знаю - умею - понимаю» – они если и вспоминают, то только для того, чтобы предать её в очередной раз анафеме. Термин «понимание» опять стал запретным, как это было при так называемой советской власти. А теперь уже эти деятели и знание для студентов вузов считают не обязательным. Главное средствами психологии бихевиоризма выработать у народа автоматизмы, которые спрятаны за модным словом – «компетенции».

Тогда возникает ряд закономерных вопросов о том, что же можно ожидать потенциальным абитуриентам и студентам в стенах преобладающего числа вузов мира? На что тратятся деньги налогоплательщиков? Каковы есть другие источники, из которых студенты инженерных вузов сейчас учатся обретать нечто новое, и каково может быть качество новизны этого обретения? Для ответа на эти вопросы необходимо рассмотреть, как проявляется в образовании и науке вторая из обозначенных выше целей образовательных систем – цель снижения уровня развития человечества – и соответствующая ей концепция «разделяй и властвуй».

При зарождении земной науки, вызванном необходимостью массового развития человеческого разума путём его перехода с мифического уровня на рациональный, наука была единой и «добывала» естествознание, т.е. знание естества Природы (физики) совместными усилиями. Когда единая наука стала набирать силу, обогащаясь этим естествознанием, стало ясно, что народ начинает быстро умнеть и управлять им с каждым днём будет всё сложнее и сложнее. Тогда правители вспомнили, что, чтобы властвовать, надо разделять, и науку разделили предварительно на две части. Одну назвали естественной наукой, другую – не естественной. Поскольку это звучало достаточно глупо (человек исключался из естества мира), и всем это было понятно, решено было заменить слово неестественная на слово «гуманистическая». Так и возник первый раскол в науке. Дальше всё пошло по накатанному пути – и естественную и неестественную науки начали тоже разделять на отдельные отрасли, потом на отдельные направления и наконец на мелкие специальности, не связанные друг с другом. Возник клан чиновников, которым было поручено следить за неприосновенностью научных границ. Возникли паспорта специальностей и штат хранителей неприосновенности этих паспортов. Но и этого показалось мало и в смысле понятия «научная парадигма» (теоретическое основание) ввели множество интерпретаций, дабы никоим образом не возникло общее понимание происходящего и единой, объединяющей науку парадигмы. Так и возникла в образовании «мультидисциплинарность» [12] – учебный план, включающий в себя совокупность образовательных дисциплин, никак не связанных друг с другом.

Апофеозом такой активности сил разъединения явилось создание в США, как в «самой передовой в мире стране», общества постмодерна, членам которого внущили, что каждый из них «звезда», имеющая свою правду (на самом деле – свою версию лжи), что каждый, сам по себе, не зависит ни от кого другого, является самодостаточной личностью (о смысле понятия «индивидуальность никому не разрешалось говорить), и эта личность и является главной ценностью общества постмодерна [13]. Иными словами, сам «чело» ушёл в небытие, а главной ценностью общества стал его инструмент.

Результат превзошёл все ожидания разработчиков: настоящее образование для масс фактически прекратило своё существование, поскольку в его стенах, как писал американский профессор G.L. Collier, студенты притворялись, что учатся, а профессора притворялись, что учат [14]; общество стало деградировать с такой скоростью, что пришлось срочно объявить о том, что самая лучшая страна уже пережила постмодерн и выходит на новый уровень развития, в котором без лишней рекламы стали восстанавливать общечеловеческие ценности. Но социальные системы достаточно инерционны и идеи постмодерна до сих пор ласкают слух невежественных гордецов и не только в США.

Что же касается политиков, то они быстро поняли, что «убить» любую страну можно без единого выстрела. Нужно только внедрить идеологию постмодерна в её науке, искусстве и образовании. Всё остальное произойдет само собой. Это и было сделано по отношению к России, для которой в так называемой ельцинской конституции, написанной западными спецслужбами, в статье 13, сказано: «1. В Российской Федерации признаётся идеологическое многообразие. 2. Никакая идеология не может устанавливаться в качестве государственной или обязательной.» [15]. Эта статья является маркером присутствия в России информационных интервентов, внедряющих идеологию постмодерна, свобода которых гарантируется пунктом 1. А пункт второй лишает Россию путеводного маяка и, как следствие, истинной суверенности, ибо никакое государство без единой цели не может существовать суверенно, поскольку суверенность может обеспечить только одна цель – создание условий для всестороннего развития и конкретного человека, и всего общества. При этом из трёх основных направлений развития («экономика - политика - нравственность») – нравственное развитие конкретного человека, его личности и общества является решающим, поскольку нравственность является единственным внутренним, субъективным регулятором человека и общества. Потому им и восхищался Э. Кант, говоря, что «Звёздное небо над головой и моральный закон внутри нас наполняют ум всё новым и возрастающим восхищением и трепетом, тем больше, чем чаще и упорнее мы над этим размышляем». В это же время экономика и политика со своими законами, являясь внешними объективными регуляторами, неизбежно ограничивают свободу воли человека, данную ему Создателем, а по сему и восхищения не вызывают, а вызывают внутренний протест, если законы экономики и политики не согласованы с мировыми нравственными универсалиями. Именно поэтому плоды так называемого коммунистического воспитания в СССР, ушли в небытие, как только было снято внешнее давление и контроль со сто-

роны политики и экономики. Всё, что дано создателем, отменить невозможно. Поэтому и развитие человека и общества возможно только при наличии в сознании каждого человека и в коллективном сознании его сообществ нравственного регулятора, на уничтожение которого во время перестройки и был направлен план А. Даллеса по завоеванию России и превращению её в сырьевую придаток Запада.

Естественно, первый удар был нанесен по системе образования России, которая долго не сдавала свои позиции, пока не стали насилием внедряться западные инновации в виде ЕГЭ, рейтингов, и цифровизации. Совсем недавно 30.12.2020 г. приказом №863 Министерства просвещения РФ в стране были закрыты все инновационные образовательные площадки. Таким образом педагогам запретили искать новые подходы, методы и методики развития системы образования. А месяцем позже в поселке Текос, пригородной зоны г. Геленджика, была ликвидирована всё тем же Минпросом жемчужина мировой педагогики «Школа радости» академика-учредителя Российской академии образования, выдающегося педагога мира М.П. Щетинина, в которой дети учились чувствовать себя едиными с миром и осознавать мир в себе. Успешные выпускники этой школы, выходя во взрослую жизнь, проявляли на своей работе незаурядные изобретательские способности, поскольку они имели доступ к бесконечному источнику инноваций и знали, умели и понимали, как и что из него можно было обретать. Именно поэтому были и крупные компании, которые старались получить выпускников Текоса в число своих сотрудников, финансово поддерживая школу М.П. Щетинина, работавшую более 20 лет без государственного финансирования. Так что, Министерство просвещения на поверку оказалось не просвещающим, а разрушающим.

Теперь посмотрим, что в итоге происходит не только в России, но и во всём мире. Ситуацию хорошо обрисовал американский физик Ли Смолин, анализируя причины застоя в физике и в других фундаментальных науках. Он пишет [16], что в инженерии, науке и философии существует две основных категорий людей, работающих в этих областях человеческой активности. Ли Смолин называет первых пророками, вторых – ремесленниками.

Пророки всегда ставили своей целью развитие человечества (расширение области понимаемого в мироустройстве) и использовали для этого преимущественно субъективный способ познания, т.е. использовали в качестве инструмента познания самого субъекта познания – самих себя, своё сознание с его безграничными информационными возможностями. Пророки – это те, кто привносит в жизнь нашей цивилизации принципиально новые обретения из того бесконечно ёмкого источника, доступ к которому открывается, как уже говорилось выше, через единение с самим собой, своим сознанием и с сознанием мира, в целом. Чтобы однозначно понять, кто может быть назван пророком, достаточно привести несколько известных имён.

Н. Тесла – подарил современному человечеству идею переменного тока, множество конструкций устройств на его основе... Всего не перечесть. Тесла всегда говорил, что идеи нового ему даёт Бог для передачи

человечеству. Он безупречно владел ментальным проектированием, мысленным экспериментом и методом визуализации мысли, что для остального человечества становится постепенно понятным только сейчас, благодаря достижениям трансперсональной психологии, которые, в свою очередь, подарили западной цивилизации восточные мастера (пророки), покинувшие Тибет, после утраты им своей суверенности.

Д.И. Менделеев – подарил человечеству периодическую систему элементов, которую он увидел, находясь в пространствеnavi своего сознания (состояние сновидений). Кстати сказать, первым элементом в его таблице был «всерод» – всё порождающая эфирная субстанция, исследования которой до сих пор закрыты для масс, поскольку то, что всё порождает, может всё и уничтожить, а современный человек всё ещё никак не может обрести ни мир в себе, ни мир вне себя. А между тем, в семиуровневой модели человека от братьев Розенкрайцеров [17] жизненное тело человека (своего рода блок питания) состоит именно из эфирных субстанций, которые человек уже научился визуализировать методом газоразрядной визуализации (ГРВ) в поле токов высокой частоты [18].

Ф.А. Кекуле – подарил современному человечеству органическую химию. Идея бензольного кольца пришла к нему в состоянии между сном и бодрствованием, в котором он наблюдал за игрой пламени огня в камине. В какой-то момент он увидел в этой игре древний символ Востока – змею, кусающую себя за хвост. Так человечество получило органическую химию, обретённую пророком из своего сознания всё тем же субъективным способом.

А.С. Попов и Г. Маркони – подарили человечеству радиосвязь. Не стоит спорить о том, кто для радиосвязи сделал больше – А.С. Попов или Г. Маркони. Главное для нас то, что своё обретение они получили из одного и того же источника.

В.И. Вернадский и французский священник Пьер Тейяр де Шарден – подарили человечеству знание о ноосфере, как о коллективном сознании планеты Земля, в котором, как и в сублиминальной зоне человеческого сознания, содержится вся планетарная информация. Чтобы избежать разнотечений в интерпретации этого понятия, а желающих его унизить достаточно много, надо помнить, что во то время, когда фашисты подошли к Москве, В.И. Вернадский в своих дневниках писал, что из ноосферы он узнал о будущем разгроме врага, что затем и произошло. Великолепный труд П.Т. де Шардена «Феномен человека», изданный в России незадолго до перестройки [19], говорит о том же – о сознании человека и о мощности коллективного сознания планеты Земля.

Перечень пророков велик и уходит в непознанные глубины веков. Есть они и сейчас и, как и ранее, их судьбы не прости: одних сжигали на кострах как Джордано Бруно и Фому Кемпийского; других распинали на крестах; третьих четвертовали; чётвёртых обворовывали, а с появлением огнестрельного оружия стали им убивать. Мало кто из них получил признание при жизни. Но они были, есть и будут всегда, ибо таков закон сохранения любой иерархии: стоящие выше должны

заботиться о развитии низших, иначе вся иерархия «просядет». Поэтому иерархия космического разума, создавшая земного человека, не прекращают о нем заботиться с целью сохранить эту изюминку космоса, а силы растворения постоянно испытывают человека на прочность, дабы не заснул на веки, а продолжал жить, творить и развиваться.

Что касается «ремесленников», то их задача – в деталях разрабатывать то, что принесли в жизнь пророки. Соответственно источник, из которого они обретают свои инновации – это уже объективно проявленный мир, – а суть обретения заключается в создании новых сочетаний из известных элементов с опорой на объективизированные законы мира и их явления в виде научных интерпретаций и парадигм. Не случайно во многих форсайт-проектах изобретательская деятельность именуется легко-конструированием, а главной задачей образовательных учреждений объявляется формирование у обучающихся навыков такого конструирования.

Статус ремесленника не зависит от наличия у него учёных степеней, учёных званий, членства в общественных и государственных академиях. Это просто своеобразный способ научной и инженерной деятельности, способ рационального мышления, тогда как пророки мыслят в основном иррационально (субъективно), а рациональность используют для упрощения передачи обретённого знания в массы, поскольку иначе невозможно внедрить свои открытия и обретения, с их помощью. В другом варианте внедрения надо быть универсалом и заниматься всем самому, что и делали, например, Н. Тесла, Г. Маркони и многие другие пророки.

Ни в коем случае нельзя унижать ни одних ни других. Их взаимодействие иллюстрируется довольно старой метафорой: пророки – это гиганты, ремесленники – это карлики, стоящие на их плечах. Но, как говорили в старину философы, карлики тем и хороши, что, стоя на плечах у гигантов, видят дальше их. Однако, если бы не было пророков, карлики не смогли бы увидеть ничего в силу своего малого познавательного «роста» – малого уровня развития когнитивных механизмов, показанных на рис. 2 в виде структуры «очей познания» [1].

Око ума – восприятие смысла в понятийных и знаковых системах



Око тела – сенсорное восприятие, ощущения

Око души – чувственное и сверхчувственное восприятие

Око духа – интуитивное восприятие

*Рис. 2. Модель когнитивной структуры человека*

Пророки отличаются от ремесленников прежде всего тем, что у них активированы все четыре из пока известных нам очей познания, т.е. они обладают интегральным видением – как рациональным (око ума и око тела), так и иррациональным, субъективным (око души и око духа) [20]. При этом человеческое «Око духа» позволяет видеть желаемое сквозь пространство и время. Без этой профессиональной «компетенции» в настоящее время практически невозможно быть настоящим изобретателем и не может существовать ни одна спецслужба, ни в одной стране.

Ремесленники в основном работают на объективном, рациональном уровне, используя осознанно только сенсорные системы и око ума, а точнее сказать физического разума [21], функции которого – фрагментация целостного мира на отдельные обособленные объекты (формы существования особей) и построение из этих фрагментов мозаики, называемой учёными научной картиной мира.

Но, будущий уровень развития человека – гармоничная актуализация всех своих когнитивных структур, т.е. интегральное видение мира [20]. Это такой этап, стадия, ступень развития, через которую никто не сможет перешагнуть. Без интегрального видения современному человеку в идущем ныне и грядущем эволюционном процессе места нет. Вот и стараются изо всех сил оцифровщики, потому как замыкание человеческого сознания в клетке цифровых симуляций – самый эффективный, внешне красивый и целесообразный способ сократить население планеты до одного, золотого миллиарда, а в последней версии, указанной на монументе в Великобритании, – до 500 млн. человек, так называемого, обслуживающего персонала [22], достаточного, по мнению «элиты» разрушителей, для обеспечения их комфортной жизни на Земле.

По этому поводу Клод Леви-Стросс как-то сказал: «Мы начали с того, что отделили человека от природы и поставили его над ней. Таким образом мы думали уничтожить самое неотъемлемое свойство человека, а именно то, что он прежде является живым существом. Тем же, что мы закрывали глаза на это общее свойство, дана была свобода для всяких злоупотреблений». Он также пришёл к заключению о том, что: «Либо 21 век будет веком гуманитарных наук, либо его не будет вообще». На этом утверждении остановимся отдельно.

#### IV. НЕИЗБЕЖНЫЙ ПУТЬ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Общеизвестно, что уровень суверенности любой страны определяется уровнем существующего в ней общего и специального образования. Если общее образование в стране не даёт возможности осваивать молодому поколению интегральное видение, а вузы страны учат только легко-конструированию, о суверенности такой страны и её граждан можно забыть и никогда не вспоминать. Под суверенностью гражданина мы понимаем возможность использования им принципа свободы воли, т.е. свободы принятия решений – единственной свободы, существующей в этом мире для человека [23]. Это же является и признаком суверенности страны. То есть, если она способна принимать самостоятельные решения, направленные на её развитие в условиях тотальной взаимосвязанности всего сущего, тогда только она и может считаться суверенной и иметь будущее.

Необходимо ещё раз подчеркнуть, что важность суверенности каждого человека и каждой страны определяется не стратегией дифференциации и не желанием ублажить свою гордыню, а необходимостью сохранения социокультурного многообразия на Земле, потому как признак снижения многообразия системы – это есть первый признак её будущей гибели. А в нашем случае – это первый признак гибели существующей цивилизации вообще, что уже происходило на земле не один раз.

Не зря Платон говорил, что появление в обществе врачей и судей является первым признаком его будущей гибели. Эта фраза всё о том же: если сознание человека столь несовершенно, что он, будучи элементарной частицей общества, не может управлять собой, своим здоровьем и поведением, то и общество, состоящее из таких элементов, – не жизнеспособно. Потому и К. Леви-Стросс фактически призывал к немедленному развитию гуманитарных наук, дабы не опоздать. Но вот уже прошла почти четверть XXI века, а гуманитарные науки, предназначенные для обучения масс, до сих пор во всем мире заперты в клетке мифов классической науки, которые абсолютно не соответствуют действительности, но преподаются во всех школах и вузах, доступных для населения. И это во многих «цивилизованных» странах.

Из этой ситуации существует только один выход: инженерное образование, как и все другие виды образования, необходимо делать интегральным – развивающим не только око тела и ока разума, но и око души и око духа. Другого пути нет, чтобы не говорили об этом бесчисленные носители силы разрушения. Только при этом можно надеяться на выживание этой цивилизации. Нужно понимать, что космосу, его творческой иерархии не нужны социальные роботы с навыками легоконструирования, поскольку они будут играть в ней роль онкологического образования. А судьба злокачественных образований всегда одна – смерть. Они гибнут, потому что выводятся системой из своей структуры с помощью средств самоочистки, либо удаляются «врачами», либо гибнут вместе с системой. Но, исход всегда один – гибель.

В плане разрешения этой ситуации ещё в 1987 г. национальная система образования предложена и внедрена в Таганрогском радиотехническом институте программа и система общекультурной и психологической подготовки инженерных кадров. Орган управления образованием России – Министерство народного образования РСФСР поддержало инициативу ТРТИ, и 29.05.1987 г. издал приказ №463 об открытии в ТРТИ кафедры «Инженерной психологии», во исполнение которого 01.07.1987 г. вышел приказ №350 ректора ТРТИ Н.Г. Малышева об организации кафедры «Инженерной психологии». Одновременно были организованы психологическая и социологическая службы вуза, усилено философское и культурологическое направления в подготовке студентов, а затем организована ещё и кафедра «Социологии».

С развитием гуманитарного аспекта в образовательном процессе ТРТИ институт был реорганизован и обрёл статус университета. В университете была открыта подготовка специалистов-психологов, а затем и аспирантура по психологии и педагогике. За время действия программы штат психологической кафедры достиг 60 человек. На её базе был организован «Южно-Российский психологический институт». В аспирантуре и докторантуре кафедры было подготовлено более 30 кандидатов наук и 6 докторов педагогических и психологических наук.

В обязательную программу психологической подготовки инженерных кадров всех специальностей входил ряд дисциплин: Человековедение; Инженерная психология; Методология инженерного творчества; Организация и управление коллективом, Безопасность жизнедея-

тельности в её интегральном видении – на уровнях вещества, энергии и информации. Дипломные проекты содержали раздел Инженерно-психологическое обоснование проекта.

Таким образом, было показано в теории и на практике единственно возможное направление развития инженерного образования – его «гуманизация» путём гуманитаризации содержания образования и внедрения трансдисциплинарной концепции взаимодействия дисциплин, предложенной более полувека назад членом «Римского клуба ста» Эрихом Янчем [12]. Суть этой концепции заключается в построении иерархической структуры дисциплин в учебном процессе с единой парадигмой и аксиоматикой, задаваемой дисциплиной иерархически верхнего уровня. Такой дисциплиной было выбрано «человековедение», поскольку без понимания сущности человека, его истинного происхождения, целей и задач пребывания на Земле, принятие адекватных действительности решений по поводу его существования, образования и развития ни теоретически (теорема К. Гёделя о неполноте), ни практически – невозможно. Естественно, что в качестве единой (объединяющей все дисциплины) парадигмы была выбрана парадигма постнеклассической науки с вытекающей из неё аксиоматикой [24].

С приходом, по плану Запада в процессе перестройки, в органы управления образованием России узкопрофильных специалистов, управляемых внешними силами, образование в стране стало быстро трансформироваться в узкопрофессиональную подготовку. В ходе этой информационной операции, соответствующей плану А. Даллеса, и в ЮФУ, после вынужденного ухода с поста ректора В.Г. Захаревича, который был у истоков разработки и внедрения описанной программы, научное и практическое направление психологического обеспечения подготовки инженерных кадров было лишено финансирования и закрыто под предлогом несоответствия профильности технических специальностей. Этому же способствовали и новые государственные стандарты, разработанные в русле всей той же узкой профильности всего.

В качестве результата этих информационных интервенций и многомиллионной утечки кадров, Россия в настоящее время испытывает колossalный недостаток в так называемых универсальных специалистах (пророков по Ли Смолину), обладающих интегральным видением проблем и ситуаций. Скомпенсировать этот недостаток можно только одним путем – развитием нравственности в стране и созданием системы интегрального образования. Другого пути сохранения суверенности России нет.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую признательность всем, кто участвовал в становлении и развитии системы психологического обеспечения подготовки инженеров в ТРТУ и принимал активное участие в её работе, а также всем тем, кто и ныне содействует её возрождению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уилбер К. Очи познания: плоть, разум, созерцание: пер. с англ. Е. Пустошкина. – М.: РИПОЛ классик, 2016. – 464 с. – (интегральный мир).
2. Бхагаван Шри Сатья Саи Баба. Истина в афоризмах; сост. Е. Богатых. – 4-е изд. – М.: Амрита, 2012. – 112 с.
3. Перих Ю.Н. Тибетско-русско-английский словарь с санскритскими параллелями. – М.: Наука, 1986. Вып. 7. – 320 с.
4. Рокотова Н. (Перих Е.И.) Основы буддизма. – 3-е изд., доп. – Рига: Угунс, 1997. – 144 с.
5. Гроф С. Холотропное сознание. Три уровня человеческого сознания и их влияние на человеческую жизнь: пер с англ. О Цветковой, А. Киселева. – М.: ООО «Издательство АСТ» и др., 2002. – 267 [5] с.: ил. – (Тексты трансперсональной психологии).
6. Монро Роберт. Путешествия вне тела: пер. с англ. – Киев: София, 2001. – М.: Изд. дом «Гелиос», 2001. – 320 с.
7. Выступление В.В. Жириновского Фрагмент № 7 стенограммы заседания Государственной Думы 17 октября 2012 г. – <http://oleg-smolin.livejournal.com/60655.html> 13.12.2021.
8. Sahni S. Guide Light of Integral Education. Retrieved from <http://www.saiorg.ru/?id=2420>, last accessed 2021/03/15.
9. Ричард Докинз. Бог как иллюзия. – Изд-во: КоЛибри, 2008. – 560 с.
10. Тендзин Вангъял Ринпоче. Тибетская йога сна и сновидений: пер. с англ. – М.: ООО Издательство «София», 2014. – 256 с.
11. Лама Анагарика Говинда. Психология раннего буддизма. – СПб.: Изд-во «Андреев и сыновья», 1993. – С. 1-129.
12. Jantsch E. Interdisciplinarity. Problems of Teaching and Research in Universities. Paris, CERI-OECD, 1972.
13. Бодрийяр Ж. Симулякры и симуляция: пер. О.А. Печенкина. – Тула, 2013. – 204 с.
14. Collier G.L. We Pretend to Teach, They Pretend to Learn – WSJ, 2013 <https://www.wsj.com/articles/we-pretend-to-teach-they-pretend-to-learn-1388103868> (дата обращения: 22.05.2021).
15. Конституция Российской Федерации [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_28399/5b9338a7944b7701fbe63f48c943e8175be16462/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28399/5b9338a7944b7701fbe63f48c943e8175be16462/) (дата обращения: 15.08.2022).
16. Смолин Л. Неприятности с физикой. Взлет теории струн, упадок науки и что за этим следует. Источник: [http://zhurnal.lib.ru/a/arta/monow\\_j\\_a/smolin.shtml](http://zhurnal.lib.ru/a/arta/monow_j_a/smolin.shtml).
17. Гендель М. Космоконцепция розенкрайцеров или мистическое христианство. – М.: Литан. 2004. – 560 с.
18. Коротков К.Г. Основы ГРВ биоэлектрографии. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2001. – 360 с.
19. Тейяр де Шардён П. Феномен человека. – М.: Наука, 1987. – 540 с.
20. Уилбер К. Око духа: Интегральное видение для слегка свихнувшегося мира: пер с англ. В. Самойлова / под ред. А. Киселева. – М.: ООО «Издательство АСТ» и др., 2002. – 476. [4] с. – (Тексты трансперсональной психологии).
21. Шри Ауробиндо. Собрание сочинений. Т. 1. Биография. Глоссарий: Пер. с англ. – СПб.: Адити, 1998. – 571 с.
22. Выступление директора Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» Михаила Валентиновича Ковальчука на заседании СФ. 17 октября 2012 г. [https://www.youtube.com/watch?v=PgBq7oOI8Hk&ab\\_channel=%D0%A1%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D1%82%D0%A4%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8](https://www.youtube.com/watch?v=PgBq7oOI8Hk&ab_channel=%D0%A1%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D1%82%D0%A4%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8) 13.12.2021.
23. Кришнамурти Дж. Первая и последняя свобода. – Нижний Новгород: ДЕКОМ, 2010. – 256 с. – (Серия «Эра Водолея»).
24. Непомнящий А.В. Введение в интегральную антропологию. Ч. 1: Методология знания и методологические основания человековедения: Учебное пособие. – Ростов-на Дону: Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – 312 с.

# Цифровые технологии в обучении цифрового поколения: проблемы личностно-профессионального развития ИТ-студентов

Лызы Наталья Александровна  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*nlyz@sfedu.ru*

Лызы Александр Евгеньевич  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*aelyz@sfedu.ru*

**Аннотация.** В статье соотнесены современные требования вуза к студентам в условиях цифровизации образования, с одной стороны, и особенности ИТ-студентов, с другой. На основе результатов многолетних исследований охарактеризованы мотивационные основания учебной деятельности студентов, готовность к выбору и реализации образовательно-профессиональной траектории, трудности, вовлеченность, удовлетворенность обучением, готовность к онлайн-обучению. Выявлены тенденции и проблемы в личностно-профессиональном развитии ИТ-студентов. Показано, что цифровому поколению для развития нужны не столько цифровые, сколько личностно-развивающие, интерактивные и проектные образовательные технологии.

**Abstract.** The article compares the modern university requirements for students in the context of digitalization of education, on the one hand, and the characteristics of IT students, on the other. Based on the results of long-term studies, the motivational foundations of students' educational activities, readiness to choose and implement an educational and professional trajectory, difficulties, engagement, satisfaction with learning, online learning readiness are characterized. Trends and problems in the personal and professional development of IT students as representatives of the digital generation are revealed. It is shown that the digital generation for development needs not so much digital as personality-developing, interactive and project-based educational technologies.

**Ключевые слова:** обучающиеся по ИТ-направлениям, цифровое поколение, цифровизация образования, готовность к обучению в вузе, студенческий опыт.

**Keywords:** IT students, digital generation, digitalization of education, university readiness, student experience.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях задача вуза – не просто дать выпускнику профессиональные знания и умения, но и способствовать личностно-профессиональному развитию студентов. В связи с этим в вузовском обучении необходимо опираться как на полученные ранее знания и когнитивные способности студентов, так и на их личностный потенциал и опыт. Поскольку сейчас в вуз уже приходят молодые люди, относящиеся к цифровому поколению, нужно понимать и учитывать их особенности. Казалось бы, все более тяготеющие к электронным и

дистанционным форматам современные образовательные процессы и технологии соответствуют потребностям цифрового поколения, «родившегося с пальцем на кнопке». Однако если рассматривать вузовское обучение с позиции не только комфорtnости, но и развивающего потенциала, в котором многообразие среды играет важную роль, то этот тезис не столь очевиден, и для его подтверждения или опровержения необходимы специальные исследования.

В настоящей статье рассматриваются два аспекта и следствия цифровизации всех сфер жизни: цифровая трансформация образования и специфика качеств и опыта студентов, принадлежащих к цифровому поколению. Сливаются ли они, усиливая друг друга и способствуя повышению качества образования или сталкиваются, ухудшая образовательные результаты и снижая возможности личностно-профессионального развития студентов? Для ответа на этот вопрос проанализированы и соопаслены современные требования вуза к студентам в условиях цифровизации образования, с одной стороны, и особенности студентов, обучающихся информационным технологиям, как наиболее ярких представителей цифрового поколения, с другой. Акцент сделан на личностных, а не на когнитивных особенностях студентов.

## II. КАКОЙ СТУДЕНТ НУЖЕН ВУЗУ?

Обучение, ориентированное на подготовку специалиста, владеющего универсальными и профессиональными компетенциями, не сводится к трансляции информации и формированию умений. Современный вуз – это пространство возможностей, в котором студент не только приобретает новые знания и умения, но и развивается личностно и профессионально, реализует и наращивает свой потенциал. Для этого в вузе организуют активную познавательную и практико-ориентированную деятельность студентов, включают их в исследовательскую или проектную групповую работу и выполнение разных ролей, обеспечивая многообразие активностей и высокий уровень самостоятельности студента, как в осуществлении учебной деятельности, так и в принятии решений относительно того, что изучать, как изучать и какие средства и ресурсы для этого использовать.

Студента, который способен использовать все эти возможности для собственного развития, называют субъектом учебной деятельности (в отечественной психологической традиции) или self-directed student (в зарубежной науке). Такого студента можно охарактеризовать следующим образом: он лично заинтересован в освоении профессионального опыта, владеет умениями саморегуляции для планирования, организации и самоконтроля учебной деятельности; принимает на себя ответственность за решения, связанные с обучением; способен ставить и решать задачи учебной деятельности, преодолевая трудности.

Использование в высшем образовании цифровых образовательных технологий, электронного и дистанционного обучения изменяет традиционную учебную деятельность и способствуют продвижению новых форм образовательной активности студентов. Интернет-пространство, цифровые инструменты и технологии обеспечивают многообразие среды и форм работы, открытость образовательного пространства, избыточность информации и определенную свободу выбора в отношении образовательного контента, способов, места, времени, темпа обучения. Это предоставляет студентам возможность учета собственных интересов, потребностей, личностных особенностей, позволяет им удовлетворять познавательные потребности и решать образовательные задачи в более легкой и удобной форме [1]. Цифровая среда расширяет возможности индивидуализированной работы с обучающимся, что потенциально повышает шансы студентов на успех, важный для роста уверенности в себе и мотивации учебной деятельности.

Однако при массовом внедрении онлайн-курсов и переходе к дистанционному формату и электронному обучению существует множество рисков, связанных с качеством образования, личностным развитием и эмоциональным благополучием обучающихся [2]. Чтобы их избежать и обеспечить успешность обучения, студент должен обладать соответствующей готовностью. Поскольку обучение приобретает черты все более свободного и индивидуализированного процесса, к студенту предъявляется еще больше требований относительно самостоятельности, мотивированности и настойчивости. Так, в структуру готовности студентов к онлайн-обучению включают компоненты, связанные с самоуправляемым обучением, тайм-менеджментом (управлением временем), коммуникативной компетентностью, технической компетентностью, мотивацией и заинтересованностью в обучении [3]. Еще больше характеристик указано в профиле успешного студента, обучающегося онлайн: развитый эмоциональный интеллект, включающий осознание потребностей и адекватное управление эмоциями, навыки саморегуляции (самодисциплину, управление временем, организацию, планирование и самоконтроль деятельности), рефлексивные стили обучения и внутренний локус контроля (склонность видеть в себе причины происходящих жизненных событий) [4]. Таким образом, использование цифровых технологий для индивидуализации и интенсификации процесса обучения будет эффективным в случае личностной зрелости и заинтересованности со стороны студента.

### III. Особенности цифрового поколения

Теория поколений – это описание особенностей людей, родившихся в определенные временные периоды с характерными политическими, социально-культурными, экономическими событиями, влияющими на формирование ценностей и психологические характеристики людей. Не абсолютизируя эту теорию, признаем тот факт, что современные подростки и молодежь, называемые «поколением Z» или цифровым поколением, гораздо больше отличаются от поколения своих родителей, чем те отличались от своих.

Одна из основных причин этого лежит в специфике новой информационной среды. В социально-когнитивной концепции цифровой социализации [5] хорошо показаны психологическое содержание и факторы, влияющие на развитие нового поколения. Современный человек проводит в цифровом мире не просто часть своей жизни, а время, сопоставимое с его активностью в реальном мире, подключаясь к Интернету и используя его как многофункциональное орудие деятельности. Он действует в смешанной, или совмещенной реальности, зачастую воспринимая ее как целостную онлайн/оффлайн среду. Смешанная реальность не ограничивается поиском и предоставлением информации, это реальность одновременно интеллектуальной и эмоциональной активности, социальных контактов, учебы, личностного роста, формирования чувства уверенности в себе и компетентности, и даже условного присутствия реально отсутствующих значимых людей. Цифровая личность включает принадлежащие человеку подключенные к сети цифровые устройства, что открывает безграничные перспективы расширения его возможностей, но порождает риски кардинального изменения образа жизни и его самого [5].

Все это говорит о том, что процессы когнитивного и личностного развития происходят сегодня по иным законам, нежели у представителей предыдущих поколений. Что же здесь является определяющим? Выделим следующие ключевые особенности условий развития нового поколения, в той или иной мере объясняющих формирующиеся у них качества [6, 7]:

1) *большие объемы информации актуализируют доминирование аудиовизуального канала и «клипового мышления», которое характеризуется сканированием информации и выхватыванием ее фрагментов, отсутствием погружения вглубь и анализа логических взаимосвязей;*

2) *в условиях большой скорости потребления информации мир воспринимается фрагментарно, короткими, разрозненными порциями, что влияет на понимание причин и следствий, порождает мозаичность образа мира и сложности формирования идентичности;*

3) *активное использование технических средств и информационных технологий способствует «технологической замене» навыков запоминания и планирования;*

4) *интенсивные потоки внешней стимуляции ведут к недоразвитию целеустремленности и способностей прогнозирования;*

5) *виртуальный мир способствует псевдоудовлетворению потребностей в признании, в достижениях, в свободе, в самореализации, замещению реального решения значимых проблем виртуальным, уходу от ответственности, сложности и противоречивости реального мира в более простой виртуальный.*

6) *трудности с различием виртуального и реального миров усиливают чувство неопределенности и неизвестности, актуализируют гедонизм, жизнь «здесь и сейчас» в ущерб деятельности на перспективу;*

7) *цифровая среда стимулирует обезличенность и скоротечность социальных связей, что ведет к эмоциональному отчуждению человека от других людей, недостатку энергетики партнерства и чувства сопричастности;*

8) *увеличение психологической дистанции между ребенком и взрослыми, недостаток позитивных эмоциональных контактов в семье и избыток информации приводят к нарушениям психического и личностного развития детей.*

Как результат, к когнитивным особенностям цифрового поколения относят: бедность сенсорного опыта, клиповое мышление, трудности с концентрацией внимания и запоминанием, привычку к высокой плотности информационных событий, способность к переключению и работе в многозадачном режиме, креативность [9]. Проблема заключается в том, что интернет воспринимается подростками и молодежью как часть собственных познавательных возможностей, что позволяет им чувствовать себя более знающими, более способными. На самом деле это иллюзия, и интернет никогда не заменит базовых знаний, мировоззрения, понимания закономерностей этого мира.

В плане личностного развития цифровому поколению характерны следующие особенности [6, 8, 9]:

1) *неустойчивость интересов и убеждений, короткий горизонт планирования, непонимание жизненных целей, «втапывание в фантазиях», страх сделать ошибку;*

2) *психологическая незрелость, инфантилизм и безответственность в поведении;*

3) *приоритетность и притягательность личной свободы, комфорта, благополучия, спокойствия;*

4) *недостаточная заинтересованность в профессиональных достижениях и карьере, требующих усилий;*

5) *неуверенность в том, что планомерные действия приведут к цели, снижающая способность работать на будущий результат.*

#### IV. Готовность студентов к обучению

Обратимся к вопросу о том, проявляются ли данные особенности в учебной деятельности и влияют ли они на готовность к обучению в вузе студентов, обучающихся по направлениям, связанным с информационными технологиями. Основываясь на обобщении результатов исследований, проведенных за последние 7 лет на базе Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, охарактеризуем мотивационные основания учебной деятельности студентов, готовность к выбору и реализации образовательно-профессиональной траектории, трудности, готовность к онлайн-обучению, а также субъективную успешность, включая вовлеченность и удовлетворенность обучением в вузе.

#### A. Мотивационные основания учебно-профессиональной деятельности

Для понимания внутренних оснований успешного обучения важную роль играет изучение мотивов выбора образовательно-профессиональной траектории, осознанности профессионального выбора и ожиданий первокурсников от обучения в вузе [10]. Результаты наших многолетних исследований показали, что для большинства студентов актуальны следующие мотивы выбора профессии и вуза: приобретение профессии, дающей хороший заработок; интересная работа по выбранной специальности; возможность сделать карьеру; желание получить диплом о высшем образовании; возможность трудоустройства по выбранной специальности.

У будущих ИТ-специалистов преобладают престижно-материальные мотивы и мотивы самореализации. Однако в первую тройку очень важных мотивов в последние годы попадают только престижно-материальные (приобретение профессии, дающей хороший заработок, желание получить диплом о высшем образовании, возможность сделать карьеру), что, вероятно, является отражением ценностных ориентиров современного общества. В 2020 году по сравнению с 2015 годом увеличилось количество первокурсников, считающих очень важными мотивами поступления в вуз «стремление по- жить веселой студенческой жизнью» (с 17 до 41%), «стремление войти в круг интеллигенции» (с 14 до 37%), «желание учиться в Таганроге» (с 15 до 27%).

Результаты диагностики ожиданий и возможностей, которые первокурсники хотели бы реализовать в процессе обучения вузе, из года в год демонстрируют нацеленность молодежи на развитие [11]. Ожидания первокурсников от учебы связаны с личностным и профессиональным развитием, реализацией познавательных и социальных потребностей, а также pragmatischeskikh interesov. Большинство первокурсников хотели бы индивидуализировать свое обучение и участвовать в управлении им. Однако с каждым годом все меньше студентов (менее трети в 2020 году), проявляющих широту интересов и разнообразие ожидаемых активностей: желающих участвовать в олимпиадах и профессиональных конкурсах, совмещать обучение с работой, участвовать в спортивных соревнованиях или в студенческом самоуправлении. У первокурсников 2020 года по сравнению с 2015 повысилась привлекательность следующих возможностей: получать повышенную стипендию, совмещать обучение с работой, проявить и развить свой творческий потенциал, найти новых друзей, весело проводить время, заслужить уважение преподавателей и однокурсников; и понизилась – управлять своим обучением (самостоятельно распределять время, выбирать тематику работ, источники информации и т.п.); выбирать дисциплины и преподавателей по своему усмотрению. Это говорит о тенденции отношения к обучению как к простому и необременительному процессу.

Большинству первокурсников характерна уверенность в сделанном профессиональном выборе, намерения работать в избранной профессиональной сфере, положительная оценка соответствия будущей профессии собственным интересам и способностям. В целом субъективные основания выбора образовательно-профессиональной траектории представлены сочетанием престижно-материальных мо-

тивов и личностной заинтересованности студентов в профессиональном обучении, что в целом совпадает с другими исследованиями первокурсников, обучающихся по техническим и ИТ-направлениям [10, 12]. Однако первокурсникам последних лет набора по сравнению с предыдущими более характерна ориентация на pragmatism, развлечения, престиж и материальные потребности.

Примерно такие же основания выбора дальнейшей образовательно-профессиональной траектории наблюдаются и у выпускников бакалавриата. Наиболее привлекательными факторами обучения в магистратуре, по мнению студентов, являются возможность освоить дополнительные знания и навыки, получение диплома и степени магистра, возможность профессионального и личностного развития, отсрочка от армии. Возможность заниматься исследовательской деятельностью отметили только 1,3% студентов. Для работающих студентов наиболее привлекательны внешние факторы – получение диплома и отсрочка от армии. Многие выпускники бакалавриата считают, что имеющегося опыта недостаточно для трудоустройства, и нужно освоить дополнительные навыки в магистратуре, но этому препятствует сложность совмещения учебы с работой, нежелание вкладывать свои силы и время в обучение.

#### *B. Готовность к выбору и реализации образовательно-профессиональной траектории*

Образовательные и профессиональные планы и намерения играют важную роль в формировании мотивации и настойчивости студентов в учебно-профессиональной деятельности, обеспечивая личностное и профессиональное развитие. Изучение перспективных планов ИТ-студентов первых-вторых курсов показало, что только 66,5% планируют закончить вуз и работать по специальности или в близкой к ней сфере. Закончить эту программу, но работать (учиться) в другой профессиональной сфере собираются 5,1%; получить диплом, а потом принимать решение о работе – 11,4%. Четких планов нет у 16,4% опрошенных. Интересно, что даже среди выпускников бакалавриата менее чем за месяц до окончания вуза отсутствуют дальнейшие планы у 16,9% студентов.

Поскольку образовательная среда вуза предлагает студентам широкий спектр возможностей, значимым фактором успешности является осознанный и обоснованный выбор студентами дисциплин, проектов и пр. Традиционно среди важных факторов выбора дисциплин студенты указывают свой интерес к их содержанию и значимость для будущей профессии. В 2022 году на третье место вышел фактор профессионализма преподавателя дисциплины. Также следует отметить существенный рост (в 2–3 раза по сравнению с опросом 2016 года) количества обучающихся, учитывающих отзывы о дисциплине и преподавателе от других студентов, выбор друзей и легкость сдачи зачета (экзамена). Изучение отношения студентов к научным проектам показало, что третья часть всех опрошенных считают, что научные проекты – это интересно, но для участия у них нет времени; 28% студентов приняли бы участие в научном проекте, если бы их пригласили; не видят особого смысла в научных проектах 17,9% студентов, причем среди магистрантов таких 22%.

В целом можно отметить, что значительная часть студентов ответственно относится к построению своей образовательной траектории, опираясь на свои интересы и профессиональные цели. Однако настораживает распространяющаяся ориентация на легкость учебы и мнение других студентов. Проблемой может стать и отсутствие профессиональных планов более, чем у четверти первокурсников и у шестой части выпускников.

#### *C. Трудности, испытываемые студентами*

Субъективно переживаемые трудности можно рассматривать не только как показатель психологической комфортности обучения и соответствия возможностей студентов требованиям вуза, но и как индикатор субъективного благополучия и возможностей развития [6]. Результаты опросов показали, что общий индекс трудностей студентов незначительно вырос за последние 6 лет. При этом существенно повысилась выраженность мотивационных трудностей: их ранг вырос с третьего в 2016 году до первого 2022 году. Многие студенты отмечают отсутствие желания ходить на занятия (76,5%) и выполнять задания (73,4%), указывают на то, что им не интересно и скучно на лекциях и других занятиях (72,3%). При этом доля лиц, которые часто испытывают мотивационные трудности, в 2022 году значимо выше, чем в 2016 году. Это говорит о том, что возросло количество студентов, для которых недостаток учебной, познавательной, профессиональной мотивации становится серьезной проблемой.

Следующими по степени выраженности у современных студентов являются регулятивные трудности. И хотя их ранг понизился с первого на второй, они остаются значимыми для большинства студентов. Так, 65,5% студентов отмечают, что им часто или периодически приходится заниматься в вечернее и ночное время, 63,0% указывают на перегрузки во время сессии, а 54,9% – на трудности отказа от развлечений в пользу учебных занятий. Данный факт свидетельствует о том, что студенты обладают не вполне сформированными навыками самоконтроля и саморегуляции, им сложно управлять временем так, чтобы все успевать.

Ранг операциональных трудностей понизился со второго в 2016 году на третий в 2022 году. Тем не менее, в последнем опросе 77,0% студентов отмечают большие затраты времени и сил на выполнение учебных заданий, а 76,6% испытывают трудности с пониманием учебного материала.

На четвертом месте по степени выраженности находятся трудности дистанционного обучения. Главной проблемой, по мнению студентов, является несбалансированное расписание при смешанном обучении. С ней сталкиваются 63,9%; 60,8% студентов отмечают трудности самодисциплины на онлайн-занятиях. Самой незначительной трудностью является недостаток собственных технических средств для дистанционного обучения. С этой проблемой часто сталкиваются только 5,3% опрошенных, что вполне объяснимо, исходя из того, что в качестве респондентов выступали студенты ИТ-направлений.

Несмотря на то, что социально-психологические трудности оказались наименее выраженным, доля студентов, их испытывающих в 2022 году значимо выше, чем в 2016 году. С трудностями нахождения «общего языка» с препо-

давателями сталкиваются 46,2% опрошенных, отсутствие общих интересов и целей в учебной группе отмечают 42,6%. Рост социально-психологических трудностей у современных студентов можно объяснить тем, что, totally погружаясь в информационное пространство как в учебно-профессиональной, так и в досуговой деятельности, они все меньше времени уделяют реальному общению, развивающему коммуникативную компетентность. Данную проблему усугубляет и дистанционное обучение [2].

В целом результаты позволяют говорить о том, что современные студенты по сравнению со студентами, обучающимися шесть лет назад, в большей мере испытывают мотивационные и социально-психологические трудности. Также для них весьма значимыми остаются проблемы саморегуляции деятельности. Конечно, изменились не только студенты, но и условия обучения. Они стали более сложными в плане многообразия среды и форматов обучения, используемых цифровых, проектных и других компетентностно-ориентированных технологий. Однако, вопреки ожиданиям, студенты не испытывают чрезмерных операциональных трудностей, не видят особых проблем в дистанционном обучении. Основная трудность для большинства из них – заставлять себя учиться.

#### D. Образовательный опыт и субъективная успешность

Анализ успешности обучения нельзя сводить к академической успеваемости, поскольку она не позволяет объяснять результаты образовательного, личностного и профессионального развития и предсказывать последующие достижения студентов [13]. Помимо результатов образования, отраженных в отметках, для успешности весьма важна позитивность субъективного восприятия обучения студентом, свидетельствующая об удовлетворении потребностей студентов в познании, в развитии, в достижениях, в признании, в самореализации. К субъективным аспектам успешности относят поведенческую вовлеченность, студенческий прогресс, удовлетворенность студентов, достижение результатов обучения, результаты трудоустройства, личностный рост и развитие [13, 14]. Под субъективной образовательной успешностью мы понимаем студенческий опыт вовлеченности и самостоятельности в учебно-профессиональной деятельности, опыт реализации в обучении базовых потребностей, а также позитивное оценочное отношение студента к условиям обучения и к себе как субъекту деятельности и развития.

Результаты изучения составляющих образовательного опыта показывают, что студенты наиболее высоко оценили свои компетенции, профессиональный и личностный рост, а также самоэффективность – свою способность к эффективной деятельности, что говорит о позитивном взгляде на себя и свое развитие. Однако 19,7% не верят, что их способностей достаточно, чтобы освоить сложные дисциплины; 27,4% считают, что они выполняют задания, не соответствующие тому, чему они хотели бы научиться; 16,6% полагают, что в вузе они не могут реализовать свои интересы; 34,4% не участвуют в необязательных, но полезных для развития учебных мероприятий; 14,6% вообще не планируют свою учебную деятельность, а 10,8% не изменяют свою стратегию при неудачах в обучении; 26,1% не обратятся к преподавателю или куратору, если будут испытывать учебные труд-

ности, а 23,6% считают, что у них нет друзей среди со-курсантов; 23,6% часто испытывают упадок сил во время учебы.

Из всех компонентов образовательного опыта наиболее низкие баллы получила вовлеченность – оценка качества вкладываемых усилий и заинтересованности в обучении. Так, 45,3% студентов отмечают, что часто, присутствуя на занятиях, не вникают в материал; 35,7% – не задают вопросы или не высказывают свое мнение на занятиях. Низкую активность можно объяснить недостатком внутренней мотивации обучающихся, а также такими перечисленными выше особенностями цифрового поколения, как неустойчивость интересов и недостаточная заинтересованность в профессиональных достижениях, требующих усилий.

Если рассматривать успешность интегрально, то среди всех опрошенных студентов доля успешных составляет 36,3%, т.е. всего чуть более трети студентов наряду с отличными и хорошими отметками характеризуются вовлеченностью и заинтересованностью в обучении, самостоятельностью в учебной деятельности, уверенностью в своих способностях к эффективной деятельности, стремлением к профессиональному и личностному развитию и удовлетворенностью обучением.

#### E. Удовлетворенность обучением в вузе

В рассмотрении самоуправляемой учебно-профессиональной деятельности студентов важное значение приобретает удовлетворенность обучением, которую мы рассматриваем как эмоционально-оценочное отношение к обучению, отражающее соответствие качеств и притязаний студента требованиям и условиям образовательного процесса вуза. Результаты ежегодных опросов показывают, что вполне удовлетворены получаемым образованием в целом 70,6% студентов, а среди выпускников таких 80,4%. Студенческой жизнью удовлетворены 75,6% опрошенных (выпускников 92,9%). Более всего студенты удовлетворены взаимодействием с преподавателями и организационными условиями обучения, менее всего – материально-технической базой (в первую очередь, условиями проживания и досуга). Сравнительный анализ удовлетворенности студентов различными аспектами обучения в 2016, 2019 и 2022 годах показал, что в целом удовлетворенность повышается. Есть лишь 3 сферы, которыми студенты все менее удовлетворены: условия проживания в общежитии, условия для досуга и содержание учебных дисциплин. Поскольку существенных изменений в этих сферах не происходило, снижение удовлетворенности можно объяснить повышением соответствующих притязаний студентов.

Если в целом удовлетворенность обучением от года к году повышается, то удовлетворенность полученным опытом снижается. По результатам опроса 2022 года только 36,1% опрошенных считают, что освоенные ими профессиональные знания и умения в целом достаточны для трудоустройства по специальности. Количество выпускников, считающих таким образом, снизилось, по сравнению с 2020 годом с 78,7% до 61,6%. Более трети (34,4%) выпускников 2022 года, считают, что полученный в вузе опыт недостаточен, чтобы быть успешным в различных видах деятельности (в 2020 – 16,6%). Можно говорить о том, что студенты довольны процессом, но не довольны результатом, что может свидетельствовать о

некотором разрыве в восприятии ими обучения: необременительная учеба без достаточной вовлеченности и нацеленности на овладение необходимым опытом.

#### F. Готовность к онлайн-обучению

Готовность к онлайн-обучению можно определить как совокупность мотивационных и организационно-деятельностных характеристик субъекта, обеспечивающих эффективность освоения знаний и умений в условиях дистанционного обучения и/или самостоятельной работы с онлайн-курсами, интернет-ресурсами и интернет-сервисами. Нами выделено пять ключевых компонентов готовности студентов к онлайн-обучению: отношение к онлайн-обучению, самостоятельность в обучении, тайм-менеджмент, коммуникативная компетентность, техническая компетентность [3]. Проведенное эмпирическое исследование [3] показало, что отношение студентов к онлайн-обучению имеет амбивалентный характер. С одной стороны, студенты понимают значимость такого обучения, с другой – они не готовы вкладывать в него достаточно времени и усилий. В силу преобладания внешней мотивации выявлена низкая вовлеченность большинства студентов в такое обучение. Наибольший вклад в общую готовность студентов к онлайн-обучению вносят два взаимосвязанных компонента: самостоятельность в обучении и тайм-менеджмент. Это означает, что в готовности наиболее важны способность студентов брать на себя ответственность за обучение и работать самостоятельно, а также навыки управления временем и эффективное планирование. Из всех компонентов готовности наиболее высоко студенты оценивают свою техническую компетентность – готовность использовать компьютерные программы, интернет-сервисы, онлайн-инструменты для решения задач обучения. Наименее низкая их готовность к онлайн-обучению в плане мотивации и коммуникации в онлайн-среде [3], что в целом соотносится с указанными выше характеристиками мотивации и трудностей студентов.

Обобщая приведенные результаты исследований, можно сделать вывод о том, что факторы снижения готовности студентов к обучению в вузе связаны с особенностями цифрового поколения. Также можно прогнозировать дальнейшие проблемы, порождающие отсев и/или снижение качества подготовки ИТ-специалистов (как обеспечения достаточного уровня профессиональных компетенций и мягких навыков выпускников), особенно в условиях цифровизации образования. В связи с этим требуется понимание и своевременное решение проблем личностно-профессионального развития студентов в вузе.

### V. ПРОБЛЕМЫ ЛИЧНОСТНО-ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ СТУДЕНТОВ

Сопоставляя необходимую и реальную готовность студентов к обучению в вузе, можно выделить три ключевые проблемы личностно-профессионального развития студентов, связанные с мотивацией и вовлеченностью, саморегуляцией и готовностью к преодолению трудностей, а также с развитием социальных навыков.

#### A. Проблемы мотивации и вовлеченности

Преобладание престижно-материальных мотивов выбора профессии, внешняя мотивация онлайн-обучения, рост мотивационных трудностей студентов, слабая заин-

тересованность и вовлеченность ряда студентов, выявленные в наших исследованиях, говорят о снижении самого ценного ресурса, обеспечивающего качество подготовки профессионала. Ведь чем больше студент вкладывает времени и усилий в достижение образовательных целей, тем больше он получает от учебы в вузе [15]. Именно вовлеченность в учебно-профессиональную деятельность обеспечивает формирование компетентности. Вовлеченность предполагает заинтересованность в овладении профессиональным опытом, внутреннюю мотивацию, основанную на познавательных потребностях, на стремлении к профессиональным достижениям, самореализации и саморазвитию. Внутренняя мотивация является одним из главных факторов развития, поскольку она не только выполняет побуждающую роль, но и актуализирует регулятивные, волевые и другие ресурсы личности в процессе достижения значимых целей и преодоления трудностей. Однако у современных студентов выявлен недостаток мотивации, объяснение которому можно найти в указанных выше особенностях представителей цифрового поколения, таких как инфантильность, слабая направленность на перспективные цели, неразвитая способность проектировать профессиональное будущее [6]. Другое объяснение лежит в сфере использования дистанционного обучения и цифровых технологий: при работе с информацией, а не с человеком, эмоционально окрашивающим знания; при работе в одиночестве, а не среди других; при отсутствии быстрой «живой» обратной связи и неверbalных сигналов, транслирующих смысловой контекст, происходит снижение мотивации и вовлеченности студентов в процесс обучения [2].

#### B. Проблемы саморегуляции

Важную роль в эффективности обучения играет готовность студентов направлять себя на значимые цели вопреки трудностям, сиюминутным импульсам и соблазнам, а также способность управлять своей учебной деятельностью – планировать, контролировать и корректировать ее. Однако описанные выше проблемы построения своей образовательно-профессиональной траектории (несформированность профессиональных планов, ориентация на легкость обучения и на мнение других студентов) и регулятивные трудности свидетельствуют о необходимости поддержки самоуправляемой учебной деятельности и повышения ответственности студентов за результаты обучения. Как указывалось выше, при использовании цифровых образовательных технологий на студента возлагается больше ответственности, а потому его успешность во многом зависит от внутренней мотивации, целеустремленности и ресурсов саморегуляции. Однако у многих студентов умения самостоятельного планирования, контроля и коррекции деятельности недостаточны, а падение мотивации при дистанционировании от коллег и преподавателей не способствует их актуализации и развитию. Это ведет к прокрастинации (откладыванию на потом), снижению самодисциплины, накоплению учебных трудностей. Желание преподавателей избежать этого посредством пошагового управления деятельностью (структурирование информации с порционной подачей, жесткое управление и регу-

лярный контроль) ставят студента в позицию обучаемого, а не обучающегося, что снижает его ответственность, инициативу, возможности самоуправления деятельностью, и соответственно не позволяет развивать навыки саморегуляции [2]. Проблема усугубляется недостатком целеустремленности и волевых ресурсов цифрового поколения, пасущего перед трудностями, что не позволяет ему эффективно использовать даже имеющиеся внутренние ресурсы управления деятельностью.

### C. Проблемы развития социальных навыков

Социальный контекст создает базис личностного становления человека, в т.ч. развития навыков общения, взаимодействия, работы в команде, публичного выступления, лидерства, а также формирования самооценки, вовлеченности, многообразных мотивов учебной деятельности и саморазвития [2]. Тенденция цифровизации всех сфер жизнедеятельности студента, включая учебную и досуговую, а также погружение в будущую ИТ-профессию, относящуюся к классу «человек – знаковая система», урезает трансляцию образцов поведения, взаимодействия, профессиональной культуры, что не позволяет достаточно развивать ресурсы личности, способствующие успешной социализации, адаптации и взаимодействию с другими в разных социальных группах. Это проявляется в выявленных эмпирических фактах: росте социально-психологических трудностей студентов, страхах обращения за помощью к преподавателям, чувстве одиночества. Недостаток социальных навыков студентов может отрицательно сказываться на эффективности деятельности, порождать проблемы в само реализаций и субъективном благополучии.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечисленные выше проблемы мотивации, саморегуляции и развития социальных навыков современных ИТ-студентов могут оказать существенное влияние на планируемые результаты обучения и даже на саму возможность представителей цифрового поколения осваивать образовательные программы вуза. Конечно, влияние цифровой среды не totally, и все студенты разные, поскольку среда как макрофактор развития действует через микросоциум, в котором находится человек (семья, сверстники, референтные группы) и преломляется через активность и систему отношений личности. Однако общие тенденции таковы, что мы все чаще будем сталкиваться как с описанными выше проблемами профессионально-личностного развития, так и с когнитивными особенностями и спецификой психологического благополучия цифрового поколения, которые не затрагивались в настоящем исследовании.

Цифровую трансформацию образования невозможно остановить и нецелесообразно игнорировать. Цифровые образовательные технологии востребуют от студентов самостоятельность, самоорганизацию, тайм-менеджмент, а потому способны и развивать эти качества. Проблема заключается в том, что для эффективного обучения необходим определенный уровень мотивационной, регулятивной и коммуникативной готовности обучающихся. Анализируя особенности ИТ-студентов вкупе с современными тенденциями цифровизации образования,

можно говорить о недостаточной личностной готовности многих студентов к обучению в вузе и, что самое проблемное, о невозможности повышения такой готовности в условиях дистанционного обучения и totalного внедрения цифровых образовательных технологий. Конечно, для вовлечения студентов можно ориентировать технологии обучения на запросы цифрового поколения, например, использовать мультимедийные ресурсы, игровые технологии, интерактивный контент, но это если и позволит сформировать знания и навыки, то не обеспечит личностно-профессионального развития. С позиции накопления целостного опыта и развития «возможность действовать и поддержка людей в этом действии – это более системно, чем все супертехнологичные решения, которыми можно вооружить человечество» [16, с. 7].

Как следует из проведенного анализа, мотивационные, регулятивные и коммуникативные ресурсы являются «слабым звеном» многих ИТ-студентов. К источникам внутренней мотивации можно отнести жизненные и профессиональные цели, ценности развития и самореализации, социальный и эмоциональный контекст обучения. С этих позиций необходимо помогать обучающимся в прогнозировании профессионального будущего и нахождении личностного смысла учебы, поддерживать профессиональное самоопределение, самопознание и саморазвитие. Таким образом, цифровому поколению для развития нужны не только цифровые, сколько личностно-развивающие, интерактивные и проектные образовательные технологии, вовлекающие студентов в реальную деятельность и взаимодействие с другими людьми, обеспечивающие рефлексию своей деятельности, способствующие нахождению значимых целей собственного развития, формированию ответственности и настойчивости в достижении целей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лызь Н.А., Истратова О.Н., Лызь А.Е. Возможности и риски информационно-образовательной деятельности студентов в интернет-пространстве // Открытое образование. – 2020. – Т. 24, № 4. – С. 67–74. – DOI: 10.21686/1818-4243-2020-4-67-74.
2. Лызь Н.А. Дистанционный формат образования и личностное развитие обучающихся // Педагогика. – 2021. – Т. 85, № 3. – С. 17–24.
3. Лызь Н.А., Истратова О.Н. Образовательная деятельность студентов в интернет-пространстве: готовность и самоэффективность // Интеграция образования. – 2021. – Т. 25, № 4 (105). – С. 661–680. – DOI: 10.15507/1991-9468.105.025.202104.661-680.
4. Kauffman H. A Review of Predictive Factors of Student Success in and Satisfaction with Online Learning // Research in Learning Technology. – 2015. – Vol. 23. – DOI: 10.3402/rlt.v23.26507.
5. Солдатова Г.У., Войскунский А.Е. Социально-когнитивная концепция цифровой социализации: новая экосистема и социальная эволюция психики // Психология. Журнал Высшей школы экономики. – 2021. – Т. 18, № 3. – С. 431–450.
6. Лызь Н.А., Лабынцева И.С. Цифровое поколение: трудности студентов и пути их преодоления // Педагогика. – 2022. – Т. 86, № 6. – С. 86–94.
7. Лызь Н.А., Непомнящий А.В., Родзин С.И. Человек и искусственный интеллект: проблемы развития и сосуществования: Монография в двух частях. – Ростов-на-Дону – Таганрог: ЮФУ, 2022. – 236 с.
8. Вербичкий А.А. Цифровое обучение: проблемы, риски и перспективы // Электронный научно-публицистический журнал «Homo Cyberus». – 2019. – № 1 (6).. – Режим доступа: <http://journal.homocyperus.ru/> Verbitskiy\_AA\_1\_2019 (дата обращения: 07.07.2022).

9. Зеер Э.Ф., Церковникова Н.Г., Третьякова В.С. Цифровое поколение в контексте прогнозирования профессионального будущего // Образование и наука. – 2021. – Т. 23, № 6. – С. 153-184.
10. Kori K.; Pedaste M.; Altin H.; Tõnisson E.; Palts T. Factors That Influence Students' Motivation to Start and to Continue Studying Information Technology in Estonia // IEEE Transactions on Education. – 2016. – Vol. 59. – P. 255–262. – DOI: 10.1109/TE.2016.2528889.
11. Лызь Н.А., Лабынцева И.С. Мотивы выбора образовательно-профессиональной траектории и ожидания первокурсников от обучения в вузе // Проблемы современного образования. – 2020. – № 5. – С. 96-105. – DOI: 10.31862/2218-8711-2020-5-96-105
12. Лызь Н.А., Нещадим И.О. Мотивация поступления в вуз как фактор компетентностно-ориентированного обучения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование. Педагогические науки». – 2018. – Т. 10, № 1. – С. 13-19. – DOI: 10.14529/ped180102.
13. Benckendorff P., Ruhinan L., Scott N. Deconstructing the student experience: a conceptual framework // Journal of Hospitality and Tourism Management. – 2009. Vol. 16, No. 1. – P. 84-93. – DOI: 10.1375/jhtm.16.1.84.
14. Botha J.-A., Coetzee M. The Influence of Biographical Factors on Adult Learner Self-Directedness in an Open Distance Learning Environment // The International Review of Research in Open and Distributed Learning. – 2016. – Vol. 17, No. 4. – DOI: 10.19173/irrodl.v17i4.2345.
15. Guo J. Building bridges to student learning: Perceptions of the Learning Environment, Engagement, and Learning Outcomes Among Chinese Undergraduates // Studies in Educational Evaluation. – 2018. – Vol. 59. – P. 195-208. – DOI: 10.1016/j.stueduc.2018.08.002.
16. Образование 20.35. Человек / АСИ. Т. 7. – Екатеринбург: Издательские решения, 2017. – 152 с.

# Эмоциональный интеллект студентов: особенности и возможности развития

Эксакусто Татьяна Валентиновна  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*exakusto@sfedu.ru*

Иванцов Евгений Викторович  
Научно-производственно-  
конструкторская фирма  
«Медиком МТД»  
Таганрог, Россия  
*ivantsovev@gmail.com*

**Аннотация.** Обнаружено, что большая часть студентов имеет низкий и средний уровень эмоционального интеллекта, характеризуется наличием сложностей в распознавании собственных эмоций и понимании причин их появления, испытывает трудности в управлении ими. В своем большинстве студенты могут справиться с задачами контроля и регуляции эмоциональных состояний, но только если интенсивность эмоций не слишком высока. Полученные данные актуализируют необходимость создания и реализации специальной тренинговой программы, направленной на развитие эмоционального интеллекта.

**Abstract.** The most part of students can be characterized by a low or average levels of intellectual intelligence, i.e. there are some difficulties in students identifying their own emotions and realizing the reasons of these emotions as well as in controlling and modulating them. Almost all students are able to cope with the problem of controlling and regulating emotional conditions, but only if intensity of emotions is not too high. The data received during the research show the necessity of setting up and implementing a training program aimed at emotional intelligence developing.

**Ключевые слова:** эмоциональный интеллект, модели эмоционального интеллекта, технологии развития, студенты.

**Key words:** emotional intelligence, emotional intelligence models, technologies of development, students.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема эмоционального интеллекта (ЭИ) широко представлена как в отечественных, так и в зарубежных исследованиях, где отмечается, что развитый ЭИ способствует не только пониманию и регуляции аффективной сферы, он помогает человеку адаптироваться к новым, необычным условиям, легко ориентироваться в разнообразных ситуациях, возникающих в различных сферах жизнедеятельности: образовательной, профессиональной, личностной, межличностной. При этом важно подчеркнуть, что эмоциональный интеллект является тем ресурсом, который определяет особенности реагирования человека на сложные жизненные обстоятельства. Развитый эмоциональный интеллект даёт возможность человеку не только быстро распознать возникающие у него эмоциональные состояния, но и «откорректировать» их в соответствии с контекстом ситуации (например, не паниковать в сложных обстоятельствах).

Таким образом можно предположить, что от того насколько развит эмоциональный интеллект, зависит степень успешности человека и его поведения в широком спектре проблем и обстоятельств.

Особую актуальность вопросы ЭИ приобретают в аспекте обучения и профессионального становления студентов инженерных направлений подготовки, что объясняется несколькими причинами. Во-первых, современное поколение студентов и магистрантов характеризуется склонностью к алекситимии, что связано с их высокой включенностью в онлайн контакты и сопровождается использованием в этой сфере эмодзи, которые достаточно ограничены по спектру эмоциональных проявлений и при этом не всегда полностью соответствуют реальным эмоциональным переживаниям. Во-вторых, требования современных образовательных стандартов предполагают умение работать в команде и владеть навыками группового взаимодействия, которые невозможно развивать без опоры на эмоциональный интеллект. Таким образом, необходим мониторинг, развитие и коррекция ЭИ в образовательном процессе, что и определило цель настоящего исследования: изучение уровня эмоционального интеллекта у студентов и магистрантов инженерных направлений подготовки, подбор адекватных методов его развития и коррекции.

Теоретический анализ показал, что определение эмоционального интеллекта (ЭИ) связано с особенностью подхода к его модели. Эмоциональный интеллект принято классифицировать по содержанию его структуры. Соответственно разделяют два типа моделей ЭИ: модели способностей и модели смешанного типа.

Модели первого типа трактуют ЭИ как когнитивную способность. Их структура состоит из набора специфических особенностей, направленных на интеллектуальную интерпретацию (сознательную или неосознанную) информации, связанной с эмоциями, и использование этой информации для достижения поставленных целей или решения жизненных задач. Одна из современных моделей способностей имеет четыре критерия, выстраивающихся в иерархию, и, по предположению авторов, развивающихся последовательно в онтогенезе [1]: восприятие, оценка и выражение эмоций; эмоциональное облегчение мышления; понимание и анализ эмоций, использование эмоциональных знаний; рефлексивное

регулирование эмоции для стимулирования эмоционального и интеллектуального роста. В свою очередь, каждый критерий включает специфические способности, выстроенные в последовательность от простых к более сложным в освоении [1]. Исследователи делают акцент на том, что ЭИ – это именно ментальная способность (набор способностей) ко взаимодействию эмоций и интеллекта.

В отличии от моделей когнитивных способностей, в моделях смешанного типа эмоциональный интеллект представлен как сочетание когнитивных способностей и личностных черт, направленных на осознание, контроль и регуляцию эмоциональной сферы, с целью повышения эффективности человека во взаимодействии с собственными эмоциями и в отношениях с другими людьми. Другими словами, можно сказать о том, что высокий уровень эмоционального интеллекта означает возможность эффективно управлять личными, социальными и экологическими изменениями, реалистично и гибко справляясь с текущей ситуацией, решая проблемы и принимая решения. В смешанной модели Д. Гоулмена представлено четыре компонента [2], которые включены в систему внутриличностного ЭИ (самосознание и самоконтроль) и межличностного ЭИ (социальная осведомленность и управление отношениями). В свою очередь самосознание, как знание того, что человек чувствует в данный момент, реалистичное понимание им собственных способностей и чувство уверенности в себе, включает: эмоциональное самосознание, точную самооценку, уверенность в себе. Не менее известна смешанная модель ЭИ Р. Бар-ОН. По мнению автора, эмоционально-социальный интеллект представляет собой сочетание взаимосвязанных эмоциональных и социальных компетенций, навыков и фасилитаторов, которые определяют, насколько эффективно человек понимает и выражает себя, понимает и взаимодействует с другими, справляется с повседневными потребностями [3]. Данная модель включает пять компонентов и пятнадцать переменных:

- a) внутриличностная сфера: эмоциональное самосознание, уверенность в себе, самоуважение, самоактуализация, независимость;
- b) межличностная сфера: эмпатия, межличностные взаимоотношения, социальная ответственность;
- c) способность к адаптации: решение проблем, связь с реальностью, гибкость;
- d) управление стрессовыми ситуациями: толерантность к стрессу, контроль за импульсивностью;
- e) преобладающее настроение: счастье, оптимизм.

Одним из российских исследователей, активно занимающихся проблемой эмоционального интеллекта, является Д.В. Люсин. Он определяет ЭИ как набор способностей к пониманию своих и чужих эмоций и управлению ими [4]. Соответственно, способность к пониманию означает, что человек может распознать эмоцию, т. е. установить сам факт наличия эмоционального переживания у себя или у другого человека; может идентифицировать эмоцию, т. е. установить, какую именно эмоцию испытывает он сам или другой человек, и найти для неё словесное выражение; понимает причины, вызвавшие данную эмоцию, и следствия, к которым она приведёт. Способ-

ность к управлению эмоциями означает, что человек может контролировать интенсивность эмоций, прежде всего приглушать чрезмерно сильные эмоции; может контролировать внешнее выражение эмоций; может при необходимости произвольно вызвать ту или иную эмоцию [4]. Как отмечает автор, эмоциональный интеллект можно представить как конструкт, имеющий двойственную природу в структуре которого представлены внутриличностный и межличностный компоненты.

Таким образом, можно сказать, что под ЭИ понимается сочетание личностных черт и когнитивных способностей, позволяющих человеку достаточно быстро адаптироваться к заданным обстоятельствам посредством регуляции эмоциональной сферы. При этом к основным когнитивным способностям относят: идентификацию, понимание и осмысление своих эмоций и других людей; контроль и управление эмоциями своими и других людей; способность выражать эмоции. К основным личностным переменным ЭИ можно отнести эмпатию, принятие себя и других, волевые качества, асертивность, мотивацию к познанию себя и других, толерантность к стрессовым ситуациям и другим людям.

В ходе изучения конструкта ЭИ отдельное внимание исследователи уделяют взаимосвязям ЭИ и его компонентов с различными индивидуально-психологическими характеристиками личности: индивидуально-типологическим и антропологическим, личностным и социально-психологическим. В частности обнаружено, что ЭИ положительно влияет на психологическое здоровье. Наиболее значимыми составляющими ЭИ в этом плане являются: способность управлять эмоциями и справляться со стрессом, стремление к достижению личных целей с намерением реализации своего внутреннего потенциала, способность контролировать чувства и мышление [3]. Исследования показали, что уровень ЭИ связан с такими личностными характеристиками «большой пятерки» как сознательность («самоконтроль – импульсивность»), дружелюбие («привязанность – обособленность»), открытость к опыту («экспрессивность – практичесность») [5–7]. Обнаружены положительные корреляции эмоционального интеллекта с общим уровнем жизнестойкости [8], субъективного благополучия [9]; с копинг-стратегиями, с успехом в творческих профессиях [10]. ЭИ значительно связан с социальным взаимодействием: люди с высоким ЭИ склонны искать и налаживать более дружелюбные, доброжелательные и позитивные отношения [11]. Эмоциональный интеллект можно рассматривать как необходимый компонент профессиональной компетентности специалиста [12] и психологической культуры личности [13].

Обобщая исследования, можно сделать вывод, что люди с высоким уровнем эмоционального интеллекта обладают широким набором способностей и личностных особенностей: уверенность в себе, эмоциональная устойчивость, принятие ответственности за качество и продолжительность собственных эмоциональных переживаний, принятие себя и других, способность к пониманию и осознанию аффективных переживаний, использование эмоций для достижения целей и др. [14].

Все эти факты приводят к тому, что в настоящее время научное сообщество, представители сферы образования и бизнес среды заявляют о необходимости раз-

вития, гибких навыков (soft skills), в числе которых находится и эмоциональный интеллект. Во многих областях деятельности человека, особенно в командных проектах, эмоциональный интеллект является основой для успеха. Это ставит вопрос необходимости мониторинга и развития ЭИ у молодежи, особенно у студентов инженерных специальностей.

Развитие эмоционального интеллекта важно вести в двух направлениях: создавая специальные условия в образовательном пространстве и путем саморазвития, самообучения.

*Создание психолого-педагогических условий* может опираться на использование различных технологий. Остановимся на некоторых из них.

### *1. Проблемно-исследовательская технология с рефлексией чувств*

Заключается в особом алгоритме решения проблемной ситуации, которая ставится перед студентами в рамках заданной темы. Использование данной технологии предполагает прежде всего создание особой (проблемной) ситуации, которая активизирует мотивацию студентов и будет способствовать: поиску информации, ассоциаций, прикладных примеров, которые могут прояснить ситуацию; обмену информацией между студентами; систематизации информационных данных (выстраивание информационных блоков в иерархию: от самых важных до наименее значимых для проблемной ситуации); анализу собранных данных с точки зрения эффективности решения проблемной ситуации/заданных условий и т.п. Одним из важнейших этапов этой технологии является подведение итогов, рефлексия. Она может проводиться при помощи ответов на вопросы анкеты:

- Мне понравилось ...
- Меня огорчило, что ...
- Мне удалось ...
- Меня удивило ...

Данная технология соответствует структуре мыслительного процесса: от порождения проблемы и формулирования мыслительной задачи к поиску решения и поиску обоснования решения. При этом вовлекая студентов в процесс обсуждения проблемы, происходит развитие как когнитивной сложности восприятия ситуации (как возможность видеть мир во всем его многообразии, уход от bipolarности: правильно/неправильно, хорошо/плохо и т.п.); так и рефлексии своего эмоционального состояния и других людей (одногруппников).

### *2. Технологии интерактивного обучения*

Интерактивные методы являются одной из самых больших групп методов, которые можно использовать в образовательном процессе с точки зрения развития эмоционального интеллекта. Интерактивные методы как специальная форма организации познавательной деятельности – это особый способ взаимодействия, в котором актуализируется развитие когнитивных и личностных особенностей как элементов эмоционального интеллекта [15]. Суть интерактивного обучения состоит в том, чтобы все студенты оказались вовлечеными в процесс познания и имели возможность понимать и

осознавать свои чувства, переживания, особенности поведения; условия, которые моделируются в образовательном процессе. Важно отметить, что использование интерактивных технологий возможно и целесообразно не только в рамках специальных психологических дисциплин, но и дисциплин профессионального блока.

Так, например, в рамках интерактивного обучения возможно использование *тренинговых технологий* как совокупности различных приемов и способов организации активности личности, формы интерактивного обучения с целью обучения чему-либо, развития различных компетенций [16]. Технология тренингового занятия может включать систему заданий, направленных на развитие большого количества умений и навыков, прежде всего профессиональных, но связанных с эмоциональным интеллектом. В ходе тренинговой работы могут решаться такие задачи как: развитие навыков социальной перцепции (точности восприятия и понимания партнеров по взаимодействию); создание условий для эмоциональной компетентности (как способности распознавать, контролировать и регулировать собственные эмоциональные состояния и состояния других людей) и др.

*Интерактивная игра* – это интервенция (вмешательство) ведущего в групповую ситуацию «здесь и теперь», которая структурирует активность членов группы в соответствии с определенной учебной целью. Часто такие игры в упрощенном виде отражают реальные жизненные, профессиональные и групповые ситуации. Из сложных аспектов внутриличностных или межличностных проблем они помогают выделить важные элементы и представляют их в искусственно созданном контексте в виде некой схемы действий. Интерактивные игры достаточно многообразны и делятся на: ситуационно-ролевые игры; игры-проживания; творческие игры; спонтанно-импровизационные игры и т.п. Их использование в образовательном процессе может способствовать развитию эмоциональной вовлеченности, эмоциональному контролю, адаптивности, инициативности, оптимизму, умению взаимодействовать с другими, т.е. всему тому, что является составляющими ЭИ.

Использование *психогимнастики* как интерактивной технологии предполагает выражение переживаний, эмоциональных состояний, проблем с помощью движения, мимики, пантомимы [17]. Спонтанность, игровая направленность, минимизация верbalного поведения и активизации невербальной знаковой системы способствует снижению напряжения, уменьшению психологической дистанции, что позволяет достаточно легко адаптироваться к взаимодействию с другими, чувствовать себя в безопасности, развивать эмоциональный интеллект. Психогимнастика, дает возможность быстро и эффективно отработать такие важные экспрессивные навыки как эффективная невербальная коммуникация, выражение чувств и эмоций, осознание чувств и эмоций других людей и т.п.

### *3. Технология Синквейн*

Синквейн представляет собой особый методический прием, технологию, предлагающую составление/написание стихотворения на заданную тему (заданное понятие, изучаемое явление), которое в короткой резюмирующей форме обобщает основные характеристи-

стики этой темы (понятия, явления). Для того, чтобы создать/написать синквейн необходимо найти и выделить в изучаемой теме/явлении наиболее существенные признаки и элементы, проанализировать их, дать краткую характеристику, сделать выводы и максимально коротко сформулировать. Именно поэтому синквейн активизирует мыслительную деятельность студентов, развивая их критическое и творческое мышление, что в свою очередь способствует развитию эмоционального интеллекта [18]. В ходе работы с синквейном развивается рефлексия и образное мышление, повышается интерес к изучаемому материалу; развиваются творческие способности; совершенствуются коммуникативные навыки (в том числе навыки выражения чувств); вырабатывается способность к анализу; расширяется тезаурус и т.п. Синквейн представляет собой составление стихотворения, состоящего из 5 строк, каждая из которых составляется по определенным правилам и существующему алгоритму.

*Технологии саморазвития и самообучения* включают в себя техники, направленные на самоанализ эмоций и мыслей. Например техника «ОЧМ» (ощущения, чувства, мысли) направлена на анализ своего состояния – от телесного до чувственного с переходом к мыслительному анализу: сначала важно сосредоточиться на своих ощущениях в теле (найти точку, которая вызывает определенные ощущения, например легкость шага, тянет плечо, напряжена мышца и т.п.), затем попробовать осознать свои чувства и эмоции в связи с этим состоянием (удивление, раздражение, тревога, восторг, нежность и т.п.), а затем проанализировать (когнитивный анализ). Эта технология расширяет диапазон осознания эмоциональных и когнитивных реакций человека, развивая его эмоциональный интеллект. Возможно использовать техники наблюдения за другими (лучше хорошо знакомыми) людьми. Для этого важно максимально сосредоточиться и увидеть как можно больше в облике, настроении, отношениях другого человека; сохранить свои впечатления об увиденном, а затем проанализировать: как меняется его выражение лица, эмоции, поведенческие реакции.

Использование любых технологий развития эмоционального интеллекта требует проведения первоначальной диагностики, что и стало целью настоящего исследования: изучить уровень ЭИ у студентов инженерных направлений подготовки, выявить его особенности.

## II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Можно предположить, что студенты будут отличаться по уровню эмоционального интеллекта с преобладанием средних и низких значений, что объясняется как особенностями современной коммуникации в молодежной среде (контакты посредством социальных сетей онлайн), так и спецификой профессиональной деятельности студентов-инженеров (ограниченные контакты в системе «человек-человек»). Для проверки этого предположения было проведено эмпирическое изучение эмоционального интеллекта. В исследовании приняли участие учащиеся бакалавриата, специалитета и магистранты Института компьютерных технологий и информационной безопасности ЮФУ ( $n = 94$ ). С целью диагностики ЭИ использовалась методика измерения эмоционального интеллекта: тест «ЭМИН» (Д.В. Люсин). По результатам применения данного опросника были полу-

чены данные по пяти субшкалам: понимание чужих эмоций, управление чужими эмоциями, понимание своих эмоций, управление своими эмоциями, контроль экспрессии, которые объединяются в четыре шкалы (межличностный ЭИ, внутриличностный ЭИ, понимание эмоций, управление эмоциями). Сумма всех 5 субшкал даёт интегральный показатель эмоционального интеллекта.

Количественная обработка данных включала использование методов статистического анализа данных: метод У Манна-Уитни для оценки различий между двумя выборками в целом и попарных различий между группами по уровню эмоционального интеллекта; критерий Н – Крускала-Уоллиса для оценки различий одновременно между тремя группами по уровню эмоционального интеллекта.

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Все участники исследования были разделены на три группы (рис. 1) исходя из результатов интегрального показателя эмоционального интеллекта. В первую группу попали участники, чей результат ниже 73 баллов (24 человека с низким уровнем ЭИ), во вторую – участники с результатом 73–92 балла (49 человек со средним уровнем ЭИ), в третью – участники, набравшие 93 и более баллов (21 человек с высоким уровнем ЭИ).

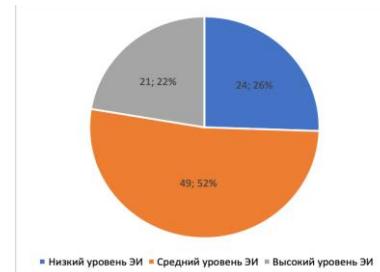


Рис. 1. Распределение выборки в соответствии с общим уровнем эмоционального интеллекта (кол-во человек; процент от общего числа респондентов)

Рассмотрим подробнее результаты изучения ЭИ по каждой группе. В табл. 1 представлены средние значения по всем компонентам эмоционального интеллекта.

ТАБЛИЦА 1. СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭИ В ГРУППЕ РЕСПОНДЕНТОВ С НИЗКИМ УРОВНЕМ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Показатель	Ср. значение	Уровень
Понимание чужих эмоций (МП)	21,0	Низкий
Управление чужими эмоциями (МУ)	16,9	Низкий
Понимание своих эмоций (ВП)	13,7	Очень низкий
Управление своими эмоциями (ВУ)	10,5	Низкий
Контроль экспрессии (ВЭ)	8,1	Низкий
Межличностный ЭИ (МЭИ)	38,0	Низкий
Внутриличностный ЭИ (ВЭИ)	32,3	Очень низкий
Понимание эмоций (ПЭ)	34,8	Низкий
Управление эмоциями (УЭ)	35,5	Низкий
Общий уровень ЭИ (ОЭИ)	70,3	Очень низкий

В группе с низким ЭИ, как видно из табл. 1, итоговый средний балл по общему уровню эмоционального интеллекта соответствует очень низкому уровню. Наибольшие трудности в данной группе наблюдаются в области понимания собственных эмоций. 96% респондентов подтверждают, что у них бывают чувства, которые они не могут объяснить. Студенты не могут чётко отличать различные эмоции, не понимают причины возникновения тех или иных эмоциональных состояний, испытывают трудности с вербализацией своих чувств, не могут отследить нарастающую злость.

Управление собственными эмоциями у респондентов данной группы находится на низком уровне. Только 8% полностью согласились с утверждением «я умею управлять своими эмоциями», и 33% заявили, что скорее согласны с этим утверждением. Студенты этой группы могут длительно пребывать в подавленном настроении, не зная, как улучшить своё состояние, долго «остывают», если кто-то их разозлил. 75% отмечают, что им трудно справляться с плохим настроением. Участники опроса заявляют, что не могут скрыть смущения при общении с незнакомыми людьми, а в критических ситуациях не умеют контролировать выражение своих эмоций.

В общении с другими людьми респонденты данной группы испытывают затруднения в распознавании чувств собеседника по неверbalным признакам, а если кто-то на них обиделся, то возникают сложности с пониманием причины обиды. Однако, все участники заявили, что могут понять, если близкий человек переживает, даже если он пытается это скрыть. 83% молодых людей из данной группы заявили, что не могут управлять чувствами других людей. Половина респондентов заявила, что теряются, если близкий человек плачет, а в случае необходимости они не знают, как ободрить или успокоить человека в сложной ситуации. Таким образом, респонденты данной группы обладают низким межличностным интеллектом и очень низким внутристичностным интеллектом, что выражается в значительных сложностях с пониманием своих эмоций и их контролем, а также в трудностях при выстраивании эффективных коммуникаций с другими людьми.

Результаты респондентов со средним уровнем ЭИ представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭИ В ГРУППЕ РЕСПОНДЕНТОВ СО СРЕДНИМ УРОВНЕМ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Показатель	Ср. значение	Уровень
Понимание чужих эмоций (МП)	24,3	Средний
Управление чужими эмоциями (МУ)	19,2	Средний
Понимание своих эмоций (ВП)	19,1	Средний
Управление своими эмоциями (ВУ)	13,2	Средний
Контроль экспрессии (ВЭ)	10,3	Средний
Межличностный ЭИ (МЭИ)	43,5	Средний
Внутриличностный ЭИ (ВЭИ)	42,6	Средний
Понимание эмоций (ПЭ)	43,4	Средний
Управление эмоциями (УЭ)	42,7	Средний
Общий уровень ЭИ (ОЭИ)	86,1	Средний

Респондентов данной группы можно охарактеризовать как относительно способных к пониманию своих эмоций и управлению ими. Они могут распознавать сами эмоции и причины их появления, однако, в отдельных ситуациях испытывают затруднения. У студентов этой группы могут возникать трудности с пониманием причин некоторых эмоций. Эти респонденты знают, как поднять себе настроение, если оно чем-либо омрачено или поддержать положительные эмоции, но не всегда могут быстро успокоиться, если их кто-то разозлил. Люди из данной группы легче в сравнении с предыдущей группой распознают эмоции другого человека и, в случае необходимости, могут поддержать его нужными словами или действиями. Можно сказать, что респонденты данной группы не испытывают серьёзных трудностей ни с собственными эмоциями, ни с эмоциональными состояниями других людей, однако, остаётся широкое поле для их развития и совершенствования.

Далее опишем группу студентов, выделенных в группу с высоким уровнем эмоционального интеллекта (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭИ В ГРУППЕ РЕСПОНДЕНТОВ С ВЫСOKИМ УРОВНЕМ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Показатель	Ср. значение	Уровень
Понимание чужих эмоций (МП)	26,0	Средний
Управление чужими эмоциями (МУ)	22,9	Высокий
Понимание своих эмоций (ВП)	24,1	Высокий
Управление своими эмоциями (ВУ)	16,2	Высокий
Контроль экспрессии (ВЭ)	12,6	Средний
Межличностный ЭИ (МЭИ)	50,8	Высокий
Внутриличностный ЭИ (ВЭИ)	53,0	Высокий
Понимание эмоций (ПЭ)	52,0	Высокий
Управление эмоциями (УЭ)	51,7	Высокий
Общий уровень ЭИ (ОЭИ)	103,8	Высокий

У респондентов данной группы на высоком уровне выражены: управление своими и чужими эмоциями, понимание своих эмоций, а средние значения по шкалам понимание чужих эмоций и контроль экспрессии очень близки к высоким показателям. В целом, респондентов можно охарактеризовать как способных хорошо различать собственные эмоции, умеющих замечать эмоции на низком уровне интенсивности и хорошо понимающих причины возникновения различных эмоциональных переживаний и состояний. Они не испытывают трудностей при описании чувств, которые испытывают по отношению к другим. 95% респондентов заявили, что умеют управлять своими эмоциями. Все 100% утверждают, что знают, чем заняться, чтобы поднять себе настроение. Почти все знают, как поддержать хорошее настроение, могут снизить интенсивность отрицательных переживаний.

Если кто-то на них обиделся, то они понимают причину и знают, как восстановить отношения. Респонденты могут поддержать близкого человека в тяжёлой ситуации. Что касается проявления эмоций, то большинство респондентов могут в критической ситуации их контролировать или скрывать, однако, они отмечают, что эмоции могут «выдать» интонация голоса или выражение лица.

Участники исследования из данной группы обладают высоким значением общего уровня ЭИ (103,8 балла) близким к очень высокому (105 баллов и выше), что проявляется в развитых способностях различать эмоции, понимать их причины и контролировать их у себя и других людей, а также выстраивать качественные взаимодействия с окружающими.

На рис. 2 и 3 представлены средние значения по шкалам и субшкалам эмоционального интеллекта для всех трёх групп.

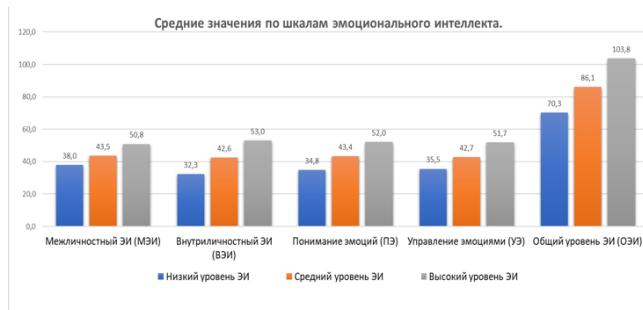


Рис. 2. Средние значения по шкалам эмоционального интеллекта по трём группам



Рис. 3. Средние значения по субшкалам эмоционального интеллекта по трём группам

Сравнительный анализ показал, что по всем субшкалам и, соответственно, и по всем шкалам присутствует рост показателей в зависимости от уровня эмоционального интеллекта. Расчёт критерия Н – Крускала Уоллиса для трёх групп и попарный расчёт критерия У – Манна Уитни для всех пар показал, что различия между группами достоверны и статистически значимы при  $p \leq 0,01$  для всех субшкал и шкал эмоционального интеллекта.

Таким образом, можно сказать, что у молодых людей, с ростом общего эмоционального интеллекта наблюдается значительный рост по каждой из таких характеристик как: понимание собственных эмоций, умение управлять собственными эмоциями, способность адекватно выражать эмоции, навык распознавания эмоций других людей и способность управлять эмоциональными состояниями других людей. Можно заключить, что респонденты с низким уровнем ЭИ, обладая неразвитыми способностями к пониманию и управлению своими и чужими эмоциями, испытывают серьёзное эмоциональное напряжение и состояние фрустрации, т.к. не могут адекватно отработать негативные эмоции, которые, не получив выхода, зачастую переходят в перманентное состояние, влияя и на психологическое, и на физиологическое состояние. Раздражительность, вспышки агрессии, устойчивые чувства обиды и

вины присущи именно людям с низким ЭИ, тогда как с ростом ЭИ люди становятся более уравновешенными, спокойными, легче прощают обиды и легче находят способы исправления ошибок и выхода из конфликтных ситуаций.

Таким образом, мониторинг уровня ЭИ у студентов инженерных направлений подготовки показал необходимость коррекции и развития как отдельных показателей, так и общего уровня эмоционального интеллекта, что является основанием для создания специальной тренинговой программы. Необходимость и актуальность такой программы обеспечивается и тем, что IQ способствует только 20% жизненного успеха – остальное связано с социальным и эмоциональным интеллектом (по мнению Д. Гоулмана). Сильные эмоции мешают ясному мышлению, а тревога подрывает интеллект, соответственно, цель коррекционно-развивающей работы состоит в том, чтобы найти разумный баланс когниций и эмоций [19]. При этом современные исследования показывают, что в профессиональном сообществе всё более востребованы люди, которые хорошо справляются с собой и эффективны во взаимоотношениях с другими.

Развитый эмоциональный интеллект подразумевает сформированность ряда специфических когнитивных способностей и личностных характеристик, относящихся как к внутриличностной, так и к межличностной сферам. Групповая тренинговая форма коррекционной работы в данном случае является наиболее оптимальной и эффективной. Целью такой программы может стать развитие эмоционального интеллекта у студентов с низким уровнем эмоционального интеллекта и коррекция (повышения уровня) ЭИ у студентов со средним уровнем эмоционального интеллекта.

Основными задачами такой программы могут стать следующие.

- Сформировать представление об эмоциональном интеллекте и его структуре.*
- Расширить «эмоциональный словарь».*
- Развить навыки распознавания эмоций, их интенсивности и причин появления.*
- Сформировать навыки контроля и управления эмоциями.*
- Развить способность конструктивно выражать свои эмоции.*
- Сформировать умение понимать эмоции и чувства другого человека.*
- Обучить навыкам регуляции своего поведения в соответствии с эмоциональным состоянием другого человека.*
- Обучить навыкам ассертивного поведения.*
- Сформировать способность эффективного взаимодействия с другими людьми.*

Методологической базой и теоретической основой для составления программы являются: системный подход в психологии (Б.Ф. Ломов); концепция единства аффекта и интеллекта (Л.С. Выготский, А.Н. Леонтьев); смешанные модели эмоционального интеллекта (Р. Ба-

рон, Д.В. Люсин); концепция влияния когнитивных факторов (автоматических мыслей и иррациональных убеждений) на эмоциональную реакцию (А. Бек, А. Эллис).

В программе, рекомендовано использовать такие методы психокоррекционной работы как: групповая дискуссия, психогимнастика, интерактивные игры, элементы аутотренинга и др.

Программа должна быть рассчитана на студентов, у которых уровень эмоционального интеллекта в ходе диагностики был определён как низкий и очень низкий, а также средний с тенденцией к низкому. Развитие эмоционального интеллекта поможет формированию более гармоничной личности, улучшит общее эмоциональное ощущение и создаст условия для более эффективного процесса обучения.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эмоциональный интеллект является важнейшим условием успешности личности, способствуя высокой точности понимания себя, своих переживаний и интенций, а также понимания других людей, их эмоций и поведения. В результате диагностики были выделены три группы респондентов: с низким, средним и высоким эмоциональным интеллектом. Респонденты из группы с высоким уровнем эмоционального интеллекта характеризуются как эмоционально устойчивые, понимающие собственные эмоциональные состояния и состояния других людей, способные поддержать положительные эмоции и снизить интенсивность негативных, а также умеющие поддержать в трудную минуту другого человека. В группе со средним уровнем эмоционального интеллекта респонденты в целом справляются со способностью правильно определять собственные эмоции и эмоции собеседников. В случае необходимости студенты из данной группы могут вполне успешно справиться с задачами контроля и регуляции эмоциональных состояний, если интенсивность эмоций не слишком высока. Респонденты группы с низким эмоциональным интеллектом характеризуются наличием сложностей в распознавании собственных эмоций и понимании причин их появления. Молодые люди из данной группы испытывают большие трудности в управлении собственными эмоциями, трудности с пониманием и управлением эмоциями других людей. Уровень их межличностного эмоционального интеллекта находится на низком уровне, а внутриличностного – на очень низком уровне. Полученные результаты отражают актуальность и необходимость развития эмоционального интеллекта у молодых людей с его средним и низким уровнем в рамках специальной тренинговой программы. Перспективой мониторинга и развития эмоционального интеллекта у студентов станет повышение их личностной и профессиональной успешности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Mayer J.D., Caruso D.R., & Salovey P. The ability model of emotional intelligence: principles and updates // Emotion Review. – 2016. – Vol. 8 (4). – P. 290-300. – DOI: 10.1177/1754073916639667.
2. Гоулман Д. Эмоциональный интеллект в работе. Серия «МИФ. Личное развитие». – Изд. Манин, Иванов и Фербер, 2020. – 512 с.
3. Bar-On R. Emotional and social intelligence: Insights from the Emotional Quotient Inventory (EQ-i). In R. Bar-On and J.D.A. Parker (Eds.), Handbook of emotional intelligence. San Francisco: Jossey-Bass. 2000. – <https://www.researchgate.net/publication/232506168> (дата обращения 11.06.22).
4. Люсин Д.В. Современные представления об эмоциональном интеллекте // Социальный интеллект: Теория, измерение, исследования / под ред. Д.В. Люсина, Д.В. Ушакова. – М.: Ин-т психологии РАН, 2004. – С. 29-36.
5. Лобанов А.П. Радчикова Н.П., Айсмонтас Б.Б., Воронова А.В. Эмоциональный интеллект: к проблеме операционализации понятия в контексте эмпирического исследования // Вестник Полоцкого Государственного университета. Психологические науки. Психология. – 2017. – № 7. – С. 69-74.
6. Люсин Д.В., Овсянникова В.В. Связь эмоционального интеллекта и личностных черт с настроением // Психология. Журнал высшей школы экономики. – 2015. – Т. 12, № 3. – С. 154-164.
7. Mayer J.D., Salovey P., Caruso D. Emotional Intelligence. New ability or eclectic traits? // American Psychologist. – 2008. – № 63. – P. 503-517.
8. Сергиенко Е.А., Ветрова И.И. Русскоязычная адаптация теста Дж. Мэйера, П. Словея, Д. Карузо "Эмоциональный интеллект" (MSCEIT V2.0): [методическое пособие]. – М.: Смысл, 2017. – 139 с.
9. Андреева И.Н. Эмоциональный интеллект как феномен современной психологии. – Новополоцк: ПГУ, 2011. – 388 с.
10. Павлова Е.М., Корнилова Т.В. Триада «толерантность к неопределенности - эмоциональный интеллект - интуитивный стиль» и самооценка креативности у лиц творческих профессий // Психологопедагогические исследования. – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 107-117. – DOI: 10.17759/psyedu.2019110109.
11. Bar-On R. The Bar-On Model of Emotional-Social Intelligence (ESI) // Psicothema. – 2006. – 18. – S. 13-25.
12. Кутеева В.П., Юлина Г.Н., Рабаданова Р.С. Эмоциональный интеллект как основа успешности в профессиональной деятельности // Отечественная и зарубежная педагогика. – 2012. – № 3. – С. 59-65.
13. Манянина Т.В. Эмоциональный интеллект в структуре психологической культуры личности: эмоциональный интеллект в структуре психологической культуры личности: автореферат дис. ... канд. психол. наук: 19.00.01; [Место защиты: Том. гос. ун-т]. – Барнаул, 2010. – 22 с.
14. Андреева И.Н. Структура и типология эмоционального интеллекта: автореферат дис. ... д-ра психол. наук: специальность 19.00.01 Общая психология, психология личности, история психологии; Белорусский государственный университет. – Минск, 2017. – 46 с.
15. Чалая Г.В. Система работы с одаренными детьми на уроках химии и во внеурочной деятельности. – Минск, 2008.
16. Вачков И.В., Дерябко С.Д. Окна в мир тренинга: методологические основы субъектного подхода к групповой работе. – СПб.: Речь, 2004. – 272 с.
17. Кибальченко И.А. Истратова О.Н., Эксакусто Т.В. Рефлексивно-интегративный подход к подготовке современного педагога в многоуровневой системе непрерывного образования // Подготовка современного педагога в многоуровневой системе непрерывного образования: коллективная монография / под ред. В. К. Шаповалова, И.Ф. Играпуло. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2015. – С. 3-46.
18. Бекешева И.С., Бобылева О.В. О возможности использования синквейна для формирования и развития критического мышления в процессе обучения теме «Многогранники» // Методист. – 2018. – № 10. – С. 41-43.
19. Гоулман Д. Бояцис Р., Макки Э. Эмоциональное лидерство: Искусство управления людьми на основе эмоционального интеллекта. – 5-е изд. – М.: Альпина Паблишерз, 2011. – 300 с.

# Оптимизм как фактор психологического здоровья студентов–первокурсников

**Истратова Оксана Николаевна**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*oistratova@sfedu.ru*

**Голубева Анастасия Сергеевна**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*anastasiya-izoto@mail.ru*

**Аннотация.** Стиль объяснения событий в разных ситуациях (оптимистичный или пессимистичный) является фактором психологического здоровья человека. Среди студентов–первокурсников большинство имеют оптимизм на уровне низкого и ниже среднего. По всем параметрам психологического здоровья (включая личностные, социальные, духовные параметры, а также показатели жизнестойкости, адаптированности к учебной деятельности и учебной группе) студенты с высоким уровнем оптимистического атрибутивного стиля статистически достоверно благополучнее своих однокурсников с низким уровнем оптимистического атрибутивного стиля. Факторные структуры по параметрам психологического здоровья в обеих группах отличаются по степени устойчивости и интегрированности показателей.

**Abstract.** The style of explaining events in different situations (optimistic or pessimistic) is a factor in a person's psychological health. Among first-year students, the majority have low or below average optimism. According to all parameters of psychological health (including personal, social, spiritual parameters, as well as indicators of resilience, adaptation to educational activities and the study group), students with a high level of optimistic attributive style are statistically significantly more prosperous than their classmates with a low level of optimistic attributive style. Factor structures in terms of psychological health parameters in both groups differ in the degree of stability and integration of indicators.

**Ключевые слова:** оптимизм, атрибутивный стиль, психологическое здоровье, жизнестойкость, адаптированность, студенты–первокурсники.

**Key words:** optimism, attributive style, psychological health, hardness, adaptability, first-year students.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Важным этапом в становлении личности является период студенчества. Наиболее сложным представляется первый год обучения в вузе, поскольку бывшим школьникам предстоит адаптироваться к новым условиям жизни и обучения, научиться взаимодействовать с новым коллективом сверстников, преподавателями, сформировать систему по самообразованию и развитию профессионально значимых качеств, а также организовать оптимальный режим обучения и отдыха.

Процесс адаптации к новым условиям обучения и жизни осложняется специфическими чертами современного поколения студентов – первокурсников как

представителей поколения Z. Появление их в цифровую эпоху предопределило наличие таких характерных особенностей, как предпочтение виртуального мира реальному, зависимость от технологий, оптимизм в отношении своей цифровой самоэффективности, повышенное доверие к информации из интернета, клиповость восприятия информации и сложность восприятия текстовой информации, 8-ми секундная фиксация внимания, стремление знать обо всем, но поверхностно, без углубления в материал с выявлением причинно-следственных связей. [1, 2]

Кроме того, представители данного поколения нередко испытывают дефицит живого общения и проблемы в командной работе, отличаются запоздалым взрослением и инфантилизмом в поведении, ожиданием похвалы и признания их действий. [3, 4] Они стремятся к саморазвитию, но при этом рассматривают его не в качестве целенаправленной образовательной деятельности, а как любое увлечение, путешествие, занятие музыкой, рисованием и т.д.

Попадая в непривычную для них обстановку, где необходимо сосредоточиться на обучении, проявить самоорганизацию и умение работать в команде, студенты–первокурсники могут испытывать тревожность и психоэмоциональную напряженность. Вместе с тем, иллюзия неисчерпаемости своих ресурсов и нацеленность на достижение высоких результатов часто приводят студентов к полному отсутствию заботы о своем здоровье. Все это может негативно отразиться на психологическом здоровье студентов–первокурсников.

Данная проблема вышла на новый виток актуальности в связи с глобальными изменениями в мире, начавшихся с пандемии COVID-19 и продолжающимися в контексте современных геополитических трансформаций. При этом само понятие психологического здоровья является актуальным давно, так как психологов всегда интересовали критерии здоровой и зрелой личности. Данный вопрос рассматривается представителями разных направлений психологической науки. Изначально разработкой указанной проблемы занимались гуманистические психологи: Г. Олпорт, К. Роджерс, А. Маслоу. Они рассматривали психологическое здоровье как стремление человека «быть самим собой» в процессе самоактуализации [5]. Термин «психологическое здоровье» впервые прозвучал в 1950 году в докладе

А. Маслоу «Self-Actualizing People: A study of Psychological Health», в котором на основе теории мотивации был представлен образ психологически здоровой и самоактуализированной личности. [6]

Особой точки зрения придерживались представители антропологического подхода (В.И. Слободчиков, А.В. Шувалов), которые подчеркивали в качестве общего принципа психологического здоровья стремление человека «быть выше себя», выделяя при этом значимость нравственных качеств личности и необходимость выхода за пределы собственно адаптации в духовное измерение бытия [7].

О. В. Хухлаева в рамках адаптационного подхода рассматривала психологическое здоровье как совокупность психических свойств, обеспечивающих согласованность между потребностями индивида и общества, и являющихся условием нацеленности человека на выполнение своих жизненных задач.

Т. А. Флоренская отмечала важность троичности состава человека (дух, душа, тело), нарушение которой ведет к болезням на физическом и психологическом уровнях. Метод духовно-ориентированного диалога Т.А. Флоренской направлен на достижение целостности личности и сплочение наличного и духовного компонентов [5].

Кроме того, проблема психологического здоровья исследовалась в работах Г.С. Никифорова, И. В. Дубровиной, Ф.Г. Васильюка, Д.А. Леонтьева, Е.Р. Калитиевской, Н.К. Смирнова, Л. А. Регуш и др. Интегрируя различные подходы и мнения, под психологическим здоровьем следует понимать совокупность личностных образований, при помощи которых человек может благополучно функционировать в трудных условиях и сохранять свой социально-личностный статус, характеризуется достаточным уровнем адаптированности для гармоничного взаимодействия в окружающей среде, реализует свой личностный потенциал, используя личные психологические ресурсы. [8].

Раскрывая проблему психологического здоровья студентов-первокурсников, стоит обратить внимание на характеристики и критерии данного конструкта.

Л.И. Акатов в качестве основным характеристикам психологического здоровья выделял:

- 1) способность личности к саморегуляции;
- 2) высокий уровень активности, а также стремление направить активность на общественно необходимую деятельность;
- 3) стрессоустойчивость, то есть способность человека противостоять сложным ситуациям и умение использовать их для личностного развития и роста. Стрессоустойчивость предполагает обладание определенными навыками и умение применять определенные техники и приемы саморегуляции в стрессовых ситуациях [9].

Саморегулируемость и стрессоустойчивость являются достаточно важными характеристиками психологического здоровья студентов-первокурсников ввиду частых стрессовых ситуаций в период обучения, а также современных условий неопределенности.

Наибольший интерес для построения полноценной картины психологического здоровья представляет психосемантический подход А. В. Козлова, согласно которому феномен психологического здоровья раскрывается по сферам реализации человека: просоциальная ориентация, гуманистическая позиция, стремление быть собой, творческое самовыражение, семейное благополучие, духовность, ориентация на цель, интеллектуальное совершенствование и развитие [10].

Термин «просоциальный» в переводе с латинского означает «в интересах общества», «совместный». Просоциальная ориентация подразумевает общественно полезную направленность моделей поведения, мотивированную заботой о других людях (эмпатия, помогающее поведение). Кроме того, указанная сфера показывает уровень удовлетворенности человека межличностными отношениями.

Гуманистическая позиция раскрывает уровень направленности личности на гуманистические ценности, на личность как главную ценность, её развитие, счастье, свободу, духовность и нравственность в воспитании.

Сфера духовности оценивает уровень развития самопознания, самооценки и саморегуляции.

Сфера семейного благополучия определяет уровень сплоченности и удовлетворенности взаимоотношений в семье, а также уровень опеки и поддержки детей родителями.

Интеллектуальное совершенствование предполагает заинтересованность в получении новых знаний, стремление к обучению и интеллектуальному развитию.

Как полагает А.В. Козлов, психологическое здоровье человека сугубо индивидуально и вариативно и может быть представлено абсолютно разным количеством сфер реализации.

Говоря о психологическом здоровье и его структурных характеристиках, необходимо упомянуть важность развития у студентов-первокурсников способности к совладанию со стрессом в контексте личностных ресурсов.

Под личностными ресурсами следует понимать психологические качества личности, способствующие эффективному преодолению трудных и стрессовых ситуаций и их последствий для дальнейшего сохранения психологического здоровья человека.

Т.Л. Крюкова, Н.П. Долгих, Д.А. Леонтьев в качестве внутриличностных ресурсов выделяли жизнестойкость и оптимизм.

Первоначально С. Мадди и С. Кобейса был введен термин «hardiness» (или жизнестойкость), который рассматривался как убеждения человека, позволяющие ему быть активным и сдерживающие отрицательные последствия стресса; как установка, при помощи которой человек обретает смысл и ценность жизни при любых обстоятельствах.

С. Мадди выделял 3 важных компонента понятия «hardiness» [11]:

- 1) вовлеченность человека в реальность с приложением максимальных усилий, времени и внимания;

2) контроль (убежденность человека в своей возможности контролировать ситуацию с максимальным влиянием на результат);

3) принятие риска (принятие всего происходящего как жизненного опыта, необходимого для своего личностного развития).

По мнению С. Мадди, «hardiness» способствует снижению стресса в случае изменений в жизни человека, усилию иммунного ответа организма, повышение ответственности по отношению к своему здоровью, а также поиск содействующей совладанию социальной поддержки.

Термин «жизнестойкость» был введен в России Д.А. Леонтьевым в 2000 г. и представлял собой личностную характеристику, отвечающую за успех в преодолении различных трудных жизненных ситуаций. Он рассматривал жизнестойкость как меру преодоления личностью самой себя и заданных обстоятельств [12]. В данном контексте жизнестойкость может быть рассмотрена, как индикатор психологического здоровья личности.

Л.А. Александрова определяла жизнестойкость как способность к преобразованию неблагоприятных жизненных ситуаций в точку роста и личностного развития, и включала такие компоненты, как:

- 1) ресурсы личности с обеспечением стратегиями совладания;
- 2) смысл;
- 3) гуманистическая этика, которая устанавливает основания выбора смысла и путь его достижения [13].

Формированию и развитию жизнестойкости могут способствовать темперамент и ценностные ориентации человека, самооценка, стрессоустойчивость, уровень образования, а также поддержка со стороны семьи и друзей. Благодаря жизнестойкости человек может устойчиво совладать с различными стресс-ситуациями, воспринимая их как менее значимые, с отсутствием ощущения внутреннего напряжения. При низком уровне жизнестойкости у человека появляется чувство тревожности и неуверенности в себе, потери жизненной перспективы.

Стоит отметить, что выраженность характеристик и сфер реализации психологического здоровья личности, в частности студентов-первокурсников, может отличаться в зависимости от атрибутивного стиля человека.

Феномен атрибуции впервые был исследован представителем теории каузальной атрибуции Т. Хайдера в 1958 г. Суть данной теории заключалась в изучении стремления человека выяснить причины происходящих событий и поведения людей [14]. Так, Б. Вайнер считал, что осознание и интерпретация человеком каждой ситуации зависит от понимания причин своего поведения, которые разделяются по трем критериям: стабильность, глобальность и локус контроля [15].

Основываясь на проведенных Т. Хайдером и Б. Вайнером исследованиях, М. Селигман, Л. Абрамсон и К. Петерсон разработали понятие атрибутивного стиля. В своих рассуждениях они отталкивались от теории выученной беспомощности, которая предполагает нарушение мотивации вследствие пережитой неподконт-

трольности ситуации, независимости результата от прилагаемых человеком усилий. М. Селигман определял атрибутивный стиль как способ объяснения причин тех или иных событий, а также поведения людей в тех или иных ситуациях [16]. В качестве основных параметров атрибутивного стиля следует выделить стабильность (постоянство или временность причины), глобальность (универсальность или конкретность причинных объяснений) и персонализацию. Исходя из характеристик каждого из указанных параметров атрибутивный стиль можно классифицировать на оптимистический и пессимистический.

Параметр стабильности предполагает ориентацию на время, в частности, насколько долго у человека сохраняется ощущение беспомощности. Например, если человек рассматривает неприятные события как постоянные, а хорошие события, как временные, то его стиль относится к пессимистическому. Если он считает, что неприятности случаются иногда и носят временный характер, а позитивные события отличаются постоянством, то его стиль объяснения причин происходящего определяется, как оптимистический [17].

Параметр глобальности показывает пространственность характеристики, позволяющей описать универсальность или конкретность причинных объяснений. Так, оптимистически настроенные люди, объясняют хорошие события универсальными причинами и чертами характера, в то время как люди с пессимистическим атрибутивным стилем объясняют их настроением либо усилиями на пути к достижению конкретных целей.

Параметр персонализации характеризует чувства по отношению к себе. Пессимистически настроенный человек во всех неприятностях винит только себя, а успехи рассматривает как следствие внешних обстоятельств. Люди с оптимистическим атрибутивным стилем во всех неприятностях винят внешние обстоятельства, а успехи и достижения считают результатом своих собственных действий и личностных характеристик.

Таким образом, у людей с оптимистическим стилем атрибуции причины неудач представляются временными и внешними, а успехи являются следствием действий самого человека и носят постоянный характер. При этом у людей с пессимистическим атрибутивным стилем неприятности рассматриваются как постоянные и предполагают внутренний характер, а успехи объясняются следствием временных внешних обстоятельств. Стоит отметить, что все три характеристики атрибутивного стиля (стабильность, глобальность, персонализация) необходимо рассматривать интегрально и индивидуально: если человек винить в своих неудачах только внешние обстоятельства, не способен брать ответственность за свои ошибки, не видит проблемы или отрицает ее существование вместо поиска путей решения (смотрит на происходящее «сквозь розовые очки»), – такой оптимизм сегодня практические психологи все чаще называют «токсичным», несущим риск дезадаптации в напряженных условиях или ситуациях неопределенности.

Помимо параметров атрибутивного стиля, Т.О. Гордеева, Е. Н. Осин, В. Ю. Шевякова предлагают рассматривать оптимистический атрибутивный стиль во взаимосвязи со следующими ситуациями [18]:

- 1) ситуация успеха;
- 2) ситуация неудачи;
- 3) ситуации достижений;
- 4) межличностные ситуации.

Позитивные и негативные события рассматриваются как независимые факторы, поскольку люди могут демонстрировать разные атрибутивные стили для ситуации успеха и для ситуации неудачи. В отношении межличностных ситуаций атрибутивный стиль может предопределять качество и гармоничность детско-родительских отношений

Следует отметить, что атрибутивный стиль человека начинает формироваться с раннего детства. М. Селигман утверждал, что на развитие определенного атрибутивного стиля оказывают влияние не только благоприятные или неблагоприятные события, но и родители, в том числе их атрибутивный стиль. Так, исследования М. Селигмана показали, что наибольшую связь атрибутивный стиль ребенка обнаруживает с атрибутивным стилем матери. Кроме того, отсутствие взаимопонимания у родителей или их развод могут повлиять на развитие пессимистического атрибутивного стиля. Другим фактором, влияющим на атрибутивный стиль человека, является критика со стороны взрослых. Негативные высказывания, адресованные ребенку во время его неудач, накладывают отпечаток на его мнение о самом себе. Внутреннее самоощущение и самооценка человека также влияют на его атрибутивный стиль.

В настоящее время достаточно большое внимание уделяется позитивным аспектам жизни личности, и развитию оптимистического взгляда на различные жизненные ситуации.

Однако существуют и негативные проявления оптимизма. Повышенная ориентированность на оптимизм могут привести к разочарованию, беспечности и эгоизму. В связи с этим, Г. Эттинген выделял два вида оптимизма [19]:

1. Положительно окрашенные мечты о благоприятном развитии каких-либо событий в будущем;
2. Реалистичные ожидания с опорой на успешный прошлый опыт.

Таким образом, в течение жизни у человека складывается определенная система способов объяснения причин происходящих событий, и когда он сталкивается с какими-либо обстоятельствами, он приписывает им причины со сложившимся у него атрибутивным стилем (оптимистическим или пессимистическим). Можно предположить, что сложившийся атрибутивный стиль может быть связан с составляющими психологического здоровья студентов-первокурсников, их адаптированностью к вузу и жизнестойкостью, как личностным ресурсом.

## II. ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления связей атрибутивного стиля с показателями психологического здоровья студентов-первокурсников было проведено эмпирическое исследование, в котором приняли участие студенты 1 курса бакалавриата и специалитета Института компьютерных технологий и информационной безопасности ЮФУ, ( $n = 142$ ;

30 девушек и 112 юношей) от 17 до 21 года (средний возраст – 18 лет). Исследование проходило с 27 марта по 4 мая 2022 года.

Были применены следующие методики.

1. Опросник «Стратегия объяснения успехов и неудач» СТОУН-П (Т.О. Гордеева, Е.Н. Осин, В.Ю. Шевякова) [18]. В результате получены данные по общему показателю оптимистического атрибутивного стиля, а также – по шкалам: оптимизм в ситуациях успеха, оптимизм в ситуациях неудач, оптимизм в ситуациях достижений, оптимизм в межличностных ситуациях.

2. Методика «Индивидуальная модель психологического здоровья» (А.В. Козлов) [10]. В результате можно получить индивидуальный профиль психологического здоровья по следующим векторам: СтВ – Стратегический вектор, ПВ – Просоциальный вектор, ЯВ – Я-вектор, ТВ – Творческий вектор, ДВ – Духовный вектор, ИВ – Интеллектуальный вектор, СВ – Семейный вектор, ГВ – Гуманистический вектор.

3. Тест жизнестойкости Мадди, в адаптации Д.А. Леонтьева, Е.И. Рассказовой [20]. В результате получены данные по следующим показателям: вовлеченность, контроль, принятие риска.

4. Методика «Адаптированность студентов в вузе» (Т.Д. Дубовицкая, А.В. Крылова) [21]. В результате получены данные по адаптированности первокурсников к учебной деятельности и студенческой группе.

Количественная обработка данных включала использование методов статистического анализа данных: метод U Манна-Уитни для оценки попарных различий между группами по уровню оптимистического атрибутивного стиля и его отдельным показателям; факторный анализ, позволяющий снизить число переменных и определить структуру взаимосвязей между ними, а также произвести анализ взаимосвязей между показателями психологического здоровья и атрибутивного стиля в группах с разным уровнем ОАС (IBM SPSS Statistics Subscription Trial for Mac OS). Гипотезы Но отвергали при  $p \leq 0,05$ .

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам изучения уровня оптимистического атрибутивного стиля (ОАС) все студенты поделились на 4 группы на основе общего показателя (рис. 1). В группу с низким уровнем ОАС вошли 33 человека (23%), в группу с уровнем ОАС ниже среднего вошли 54 человека (38%), в группу с уровнем ОАС выше среднего вошли 49 человек (35%) и только 6 человек (4%) составили группу с высоким уровнем ОАС.

Таким образом, склонность позитивно оценивать происходящее, как опыт, проявляют только чуть больше трети респондентов. Это может быть фактором риска психологического благополучия и здоровья молодых людей, их стрессоустойчивости и адаптированности, в том числе – и к обучению в вузе. Опросник «СТОУН-П» позволяет определить не только общий показатель оптимизма, но и степени проявления оптимизма в ситуациях неудач, успехов, достижения и межличностных ситуациях. Процентное соотношение респондентов в зависимости от ситуации представлено на рис. 2.



Рис. 1. Распределение выборки в соответствии с общим уровнем оптимистического атрибутивного стиля (кол-во человек; процент от общего числа респондентов)

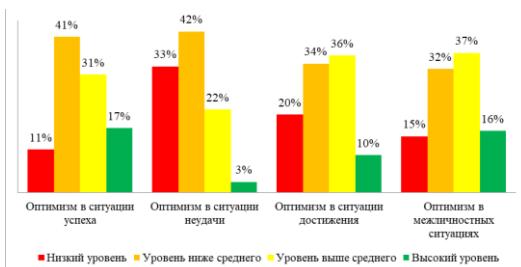


Рис. 2. Распределение выборки в соответствии с ситуациями проявления оптимизма в группах с разным уровнем оптимистического атрибутивного стиля

Как видно на представленной гистограмме, максимальное количество студентов-первокурсников (75%) проявляют низкий уровень оптимизма (33%) и уровень ниже среднего (42%) в ситуации неудачи. Это объясняется характерными особенностями современного поколения студентов как представителей поколения Z: они более чувствительны к вероятным промахам и неудачам, более ориентированы на признание и похвалу. Решая сложные задачи в виртуальном пространстве, современные студенты оказываются совершенно не готовы к возникающим жизненным трудностям. В таких случаях возможно застревание на какой-либо конкретной причине происходящего в поисках виновных.

При этом наибольший процент респондентов с высоким уровнем оптимизма (но все равно малочисленный, по сравнению с низким и ниже среднего уровнем оптимизма) представлен в ситуациях успеха и межличностных ситуациях, поскольку в подобных ситуациях легче поверить в свои силы, проявить свои коммуникативные способности и нацеленность на успех для достижения высоких результатов в обучении.

Для дальнейшего анализа результатов по методу контрастных групп было сформировано 2 подвыборки: в первую вошли 33 человека с низким уровнем ОАС. Вторая подвыборка была сформирована из шести респондентов с высоким уровнем ОАС и 28 респондентов с уровнем ОАС выше среднего (с максимальными для этой группы баллами). В итоге были составлены две уравненные по количеству респондентов подвыборки, которые в дальнейшем будут условно именоваться как группа с низким уровнем ОАС (33 человека) и группа с высоким уровнем ОАС (34 человека).

Рассмотрим подробнее результаты изучения атрибутивного стиля по отдельным его показателям для каждой группы в сравнении (рис. 3).

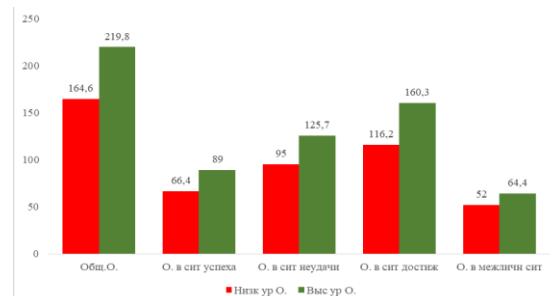


Рис. 3. Средние значения показателей оптимизма в контрастных группах.

Как видно на гистограмме, средние показатели группы с высоким показателем оптимизма статистически выше ( $p \leq 0,01$ ) показателей группы с низким уровнем оптимизма в ситуациях успеха, неудачи, достижения и межличностных ситуациях. При этом наиболее выражены показатели двух групп оптимизма в ситуации достижения. Это обусловлено тем, что студенты-первокурсники в первый год обучения более ориентированы в достижении высоких результатов в учебной деятельности, получении признания и похвалы.

Низкие показатели двух групп оптимизма в межличностных ситуациях могут характеризовать возможные проблемы в коммуникации студентов-первокурсников. В первый год обучения студенты формируют новый круг общения в новых условиях, нередко сталкиваясь с возможным недопониманием и проблемами командной работы в силу специфических особенностей современного поколения. Кроме того, подобные показатели могут свидетельствовать о дисгармонии детско-родительских отношений.

Попарное сравнение характеристик психологического здоровья с помощью критерия У Манна-Уитни у групп с низким и высоким уровнем ОАС показало статистически достоверные ( $p \leq 0,01$ ) по всем показателям. Полученные различия стали основанием для изучения особенностей взаимосвязей оптимистического атрибутивного стиля и показателей психологического здоровья в выделенных группах.

На этапе факторного анализа для снижения количества переменных и нахождения согласованности (однородности) показателей психологического здоровья мы использовали следующие условные обозначения в факторных структурах:

1. Показатели индивидуального профиля психологического здоровья:

- стратегический вектор;
- просоциальный вектор;
- Я-вектор;
- творческий вектор;
- духовный вектор;
- интеллектуальный вектор;
- семейный вектор;
- гуманистический вектор.

2. Показатели адаптированности к вузу:

- адаптированность к учебной группе;
- адаптированность к учебной деятельности.

3. Показатели жизнестойкости:

- вовлеченность;
- контроль;
- принятие риска.

*A. Факторизация результатов студентов группы с низким уровнем общего показателя оптимистического атрибутивного стиля*

В процессе факторного анализа полученный суммарный % дисперсии равен 75, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

В выделения факторов методом главных компонент и вращения (варимакс с нормализацией Кайзера) получена четырехкомпонентная факторная структура. Результаты представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ФАКТОРНАЯ СТРУКТУРА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО ЗДОРОВЬЯ СТУДЕНТОВ С НИЗКИМ УРОВНЕМ ОПТИМИСТИЧЕСКОГО АТРИБУТИВНОГО СТИЛЯ

Показатели	Компонент			
	1	2	3	4
Стратегический вектор	<b>,793</b>	,052	,237	-,090
Просоциальный вектор	,213	<b>,800</b>	,034	,059
Я-вектор	<b>,673</b>	,029	-,259	,233
Творческий вектор	,104	,136	,505	<b>-,637</b>
Духовный вектор	-,322	<b>,743</b>	,035	,371
Интеллектуальный вектор	<b>,627</b>	,360	,372	,073
Семейный вектор	,242	,217	,240	<b>,741</b>
Гуманистический вектор	,085	- ,012	<b>,816</b>	,009
Адаптация к учебной группе	,484	<b>,714</b>	,080	-,262
Адаптация к учебной деятельности	<b>,625</b>	,710	,083	,065
Вовлеченность	<b>,730</b>	,382	,409	-,018
Контроль	,560	<b>,567</b>	,501	,043
Принятие риска	<b>,599</b>	,216	,536	,337
Нагрузка факторов (%)	27,2	22,4	15,0	10,4

*Примечание:* полужирным выделены переменные, вошедшие в соответствующий фактор с наибольшим весом.

Выделено 4 фактора, структура полная, неустойчивая (в третий фактор вошла только одна переменная), с преобладанием прямых связей.

*Первый фактор* является максимально нагруженным в данной группе и включает в себя 6 переменных, определяющих волевые и интеллектуально-личностные качества как индикаторы психологического здоровья: стратегический вектор (эмоциональная уравновешенность и настойчивость в достижении цели), Я-вектор (стремление к самовыражению), интеллектуальный вектор (стремление к получению новых знаний и самопознанию), адаптация к учебной деятельности, вовлеченность и принятие риска как составляющие жизнестойкости. Все эти переменные находятся на низком и ниже среднего уровнях, поэтому в данной структуре можно говорить о несформированности интегрированности составляющих психологического здоровья.

*Второй фактор* объединяет четыре переменные: просоциальный вектор, духовный вектор, адаптация к учебной группе, контроль (как компонент жизнестойкости).

*Третий фактор* включает одну переменную, что говорит о неустойчивости структуры.

*Четвертый фактор* амбивалентен: включает взаимосвязь двух разнонаправленных факторов: творческого и семейного векторов.

*B. Факторизация результатов студентов группы с высоким уровнем общего показателя оптимистического атрибутивного стиля*

В процессе факторного анализа полученный суммарный % дисперсии равен 74,57 что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

В выделения факторов методом главных компонент и вращения (варимакс с нормализацией Кайзера) получена пятикомпонентная факторная структура. Результаты представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. ФАКТОРНАЯ СТРУКТУРА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО ЗДОРОВЬЯ СТУДЕНТОВ С ВЫСOKИМ УРОВНЕМ ОПТИМИСТИЧЕСКОГО АТРИБУТИВНОГО СТИЛЯ

Показатели	Компонент				
	1	2	3	4	5
Стратегический вектор	,011	<b>,807</b>	-,162	,185	-,066
Просоциальный вектор	-,075	,057	-,010	,145	<b>,914</b>
Я-вектор	,161	-,042	<b>,789</b>	-,084	,109
Творческий вектор	,133	<b>,623</b>	,459	-,254	,070
Духовный вектор	,292	,024	,397	<b>,595</b>	,158
Интеллектуальный вектор	,261	<b>,613</b>	,161	-,465	,125
Семейный вектор	,052	-,001	-,041	<b>,798</b>	,065
Гуманистический вектор	-,245	,179	<b>,684</b>	,428	-,168
Адаптация к учебной группе	,490	-,091	,082	-,056	<b>,730</b>
Адаптация к учебной деятельности	<b>,825</b>	-,094	,029	-,056	,069
Вовлеченность	<b>,841</b>	,264	,037	,240	,111
Контроль	<b>,803</b>	,411	,158	,023	,019
Принятие риска	,413	<b>,591</b>	,528	,178	-,090
Нагрузка факторов (%)	20,8	15,8	14,0	12,4	11,4

*Примечание:* полужирным выделены переменные, вошедшие в соответствующий фактор с наибольшим весом.

Выделено 5 факторов, структура полная, устойчивая, с прямыми связями.

*Первый фактор* определяется переменными адаптации к учебной деятельности и компонентами жизнестойкости: вовлеченностью и контролем.

*Второй фактор* объединяет четыре переменные: стратегический вектор (эмоциональная уравновешенность и настойчивость в достижении цели), творческий вектор, интеллектуальный вектор (стремление к получению новых знаний и самопознанию), принятие риска (как компонент жизнестойкости).

*Третий фактор* включает Я-вектор и гуманистический вектор, характеризующие личностные компоненты психологического здоровья.

*Четвертый фактор духовный и семейный вектор.*

*Пятый фактор* просоциальный вектор психологического здоровья и адаптированность к учебной группе, что можно определить, как социально-психологические характеристики психологического здоровья.

Сравнительный анализ факторных структур в группах с низким и высоким уровнем оптимистического атрибутивного стиля показал, что обе структуры полные, однако в группе с низким уровнем оптимизма структура неустойчивая, факторы объединяют показатели среднего и низкого уровней, статистически достоверно отличающихся от показателей среднего и высокого уровней факторной структуры группы с высоким уровнем оптимизма. Это означает, что в группе с низким уровнем оптимизма интегрированность характеристик структуры психологического здоровья не сформирована. Для обеих групп наиболее значимым индикатором психологического здоровья, положительно связанным с оптимистическим атрибутивным стилем, стала адаптированность к учебной деятельности. Это определяет важность психологического сопровождения первокурсников в аспекте их адаптации к обучению в вузе через развитие у них позитивного мышления для повышения стрессоустойчивости.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Психологическое здоровье студентов-первокурсников, а также выраженность его характеристик в зависимости от атрибутивного стиля человека является достаточно важной и актуальной проблемой в настоящее время, поскольку сохранение психологического здоровья и развитие позитивного мышления необходимы в период обучения в вузе и дальнейшего профессионального становления личности. По результатам исследования, 61% студентов-первокурсников показали уровень оптимизма низкий и ниже среднего. При этом необходимые для студентов-первокурсников умения гибко воспринимать неудачи не проявлены должным образом в силу своей несформированности. Лишь у 39% опрошенных выражен уровень оптимизма выше среднего, из них высокий уровень оптимизма у 4% студентов.

По показателям психологического здоровья студентов выявлены статистически значимые различия между группами с разным уровнем оптимизма по стратегическому, духовному и интеллектуальному векторам. Студенты с высоким уровнем оптимизма отличаются эмоциональной устойчивостью, стремлением к развитию и получению новых знаний и опыта, вовлеченностью в учебную деятельность. Студенты с низким уровнем оптимизма характеризуются импульсивностью, напряженностью, восприятием возможных трудностей как глобальной проблемы, вероятностью депрессивных настроений, отсутствием выраженного стремления к самопознанию и развитию. Статистически достоверными являются различия и в степени адаптированности к учебной деятельности и новому коллективу в выделенных группах.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости развития оптимизма и позитивного мышления. Это может помочь студентам в восстановлении эмоциональных ресурсов для выполнения трудной задачи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Печенева Т.А. Студенты поколения Z – как понять и как научить? // Современные инновации. – 2020. – № 1 (35). – С. 54-56.
2. Лызь Н.А., Истратова О.Н. Образовательная деятельность студентов в интернет-пространстве: готовность и самозэффективность // Интеграция образования. – 2021. – Т. 25, № 4 (105). – С. 661-680.
3. Рындак В.Г. Профессиональное самоопределение студентов из поколения Z: проблемы, пути решения // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2019. – № 5(223). – С. 91-99. – DOI: 10.25198/1814-6457-222-91.
4. Лызь Н.А., Истратова О.Н., Лызь А.Е. Возможности и риски информационно-образовательной деятельности студентов в интернет-пространстве. Открытое образование. – 2020. – 24 (4). – С. 67-74. – <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2020-4-67-74>.
5. Шувалов А.В. Антропологические аспекты психологии здоровья // Национальный психологический журнал. – 2015. – № 4 (20). – С. 23-36.
6. Журавлев А.Л., Воловикова М.И., Галкина Т.В. Психологическое здоровье личности и духовно-нравственные проблемы современного российского общества // Труды Института психологии РАН. – М.: Изд-во "Институт психологии РАН", 2014. – 318 с. – ISBN 978-5-9270-0294-8.
7. Сергиенко Е.А. Психологическое здоровье: субъективные факторы // Вестник РГГУ. Серия: Психология. Педагогика. Образование. – 2017. – № 4 (10). – С. 98-117.
8. Хватова М.В. Ресурсы личности и психологическое здоровье: соотношение понятий // Психология человека в условиях здоровья и болезни: Материалы V Международной научно-практической конференции, Тамбов, 05 - 06 июня 2015 года. – Тамбов: Тамбовская региональная общественная организация "Общество содействия образованию и просвещению "Бизнес - Наука - Общество", 2015. – С. 61-67.
9. Теплякова И.В. Формирование стрессоустойчивости как актуальная проблема студентов-первокурсников вуза // Азимут научных исследований: педагогика и психология. – 2018. – Т. 7, № 1 (22). – С. 216-219.
10. Козлов А.В. Методика диагностики психологического здоровья // Перспективы науки и образования. – 2014. – № 6 (12). – С. 110-117.
11. Зятькова Е.О. Психологические ресурсы стрессоустойчивости и жизнестойкости студентов в контексте психического здоровья // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. – 2021. – № 5(195). – С. 483-486. – DOI: 10.34835/issn.2308-1961.2021.5. – Р. 483-487.
12. Логинова М.В. Жизнестойкость как внутренний ключевой ресурс личности // Вестник Московского университета МВД России. – 2009. – № 6. – С. 19-22.
13. Никитина Е.В. Феномен жизнестойкости: концепция, современные взгляды и исследования / Е. В. Никитина // Academy. – 2017. – № 4 (19). – С. 100-103.
14. Пукишин А.Р. Каузальная атрибуция // European research: сборник статей XVI Международной научно-практической конференции: в 2 ч., Пенза, 14 августа 2018 года. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2018. – С. 211-213.
15. Абакарова С.М. О влиянии атрибутивного стиля на социализацию подростков // От истоков к современному: 130 лет организации психологического общества при Московском университете: сборник материалов юбилейной конференции: в 5 томах, Москва, 29 сентября – 01 октября 2015 года / Ответственный редактор: Богоявленская Д.Б. – М.: Изд-во Когито-Центр, 2015. – С. 85-87.
16. Сохань Л.В. Личностный потенциал: структура и диагностика / под ред. Д.А. Леонтьева. // Психология. Журнал Высшей школы экономики. – 2012. – Т. 9, № 4. – С. 151-154.
17. Русалов В.М. Атрибутивные стили и характер // Психологический журнал. – 2008. – Т. 29, № 4. – С. 44-53.
18. Гордеева Т.О., Осин Е.Н., Шевякова В.Ю. Диагностика оптимизма как атрибутивного стиля (Опросник СТОУН). – М.: Смысл, 2008. – 154 с.
19. Жижина М.В. Оптимизм как искусство мыслить позитивно (к разработке психолого-образовательной программы) // Педагогические и социальные проблемы образования: материалы Международной научно-практической конференции, Чебоксары, 11 октября 2019 года. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2019. – С. 175-181. – DOI: 10.31483/r-43493.
20. Леонтьев Д.А., Рассказова Е.И. Тест жизнестойкости. – М.: Смысл, 2006. – 63 с.
21. Дубовицкая Т.Д., Крылова А.В. Методика исследования адаптированности студентов в вузе // Психологическая наука и образование. – 2010. – № 2. – [www.psyedu.ru](http://www.psyedu.ru) / ISSN: 2074-5885.

# Разработка инженерного калькулятора для обучения подбору пылеулавливающего оборудования аспирационных систем

**Боровков Дмитрий Павлович**  
Институт архитектуры и  
строительства  
Волгоградский государственный  
технический университет  
Волгоград, Россия  
*frigate@yandex.ru*

**Сидякин Павел Алексеевич**  
Пятигорский институт  
Северо-Кавказский федеральный  
университет  
Пятигорск, Россия  
*sidyakin\_74@mail.ru*

**Щитов Дмитрий Викторович**  
Пятигорский институт  
Северо-Кавказский федеральный  
университет  
Пятигорск, Россия  
*pgtugsh@mail.ru*

**Аннотация.** В настоящей статье приведено описание компьютерной программы, представляющей собой инженерный калькулятор, предназначенный для обучения инженеров проектирующих инженерно-экологические системы очистки газопылевых выбросов промышленных производств. Рассматриваемый калькулятор позволяет производить экспресс оценку основных технических характеристик систем аспирации промышленных предприятий, для упрощения подбора необходимых компонентных решений, и быстрого их сопоставления.

**Abstract.** This article describes a computer program that is an engineering calculator designed to train engineers designing engineering and environmental systems for cleaning gas and dust emissions from industrial production. The calculator in question allows you to make an express assessment of the main technical characteristics of aspiration systems of industrial enterprises, to simplify the selection of the necessary layout solutions, and their quick comparison.

**Ключевые слова** Системы аспирации; эффективность пылеулавливания; компоновочные схемы; экспресс расчет (оценка; обучение проектированию систем аспирации).

**Keywords** aspiration systems; dust collection efficiency; layout diagrams; express calculation (assessment; training in the design of aspiration systems).

## I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема загрязнения воздушной среды пылевыми выбросами, в настоящее время, является существенным препятствием на пути повышения производительности промышленных предприятий, и увеличения выпуска промышленных товаров. Основным средством снижения пылевого загрязнения, сопутствующего технологическим процессам промышленных предприятий являются аспирационные системы, основное назначение которых состоит в улавливании пылевых частиц, содержащихся газах, отходящих от технологического оборудования. Применение аспирационных систем, снабженных современным пылеулавливающим оборудованием, позволяет достигать степеней очистки пылевых выбросов превышающей 95% [1, 2, 4]. Такие показатели эффективности

работы инженерно-экологических систем позволяют свести антропогенное воздействие промышленных предприятий к допустимым безопасным уровням и соблюсти ужесточившиеся требования природоохранного законодательства [1, 3, 4].

Однако, для достижения высоких значений степени очистки пылевых выбросов, посредством применения современного пылеулавливающего оборудования, требуется тщательное соблюдение конструктивных требований и технологических параметров его применения, а также учет особенностей обслуживаемого технологического оборудования и компоновочной схемы системы аспирационных воздуховодов [2, 4]. Особенно это касается многоступенчатых систем очистки пылевых выбросов, с использованием сложных схем рециркуляции очищаемого газа, наличием байпасов, и применением пылеулавливающих аппаратов с несколькими вводами очищаемого газа [1, 2].

Решение подобных задач характеризуется наличием большого количества итерационных расчетов, а также требует от проектировщика большого опыта и наличия некоторой профессиональной интуиции. Наибольшие затруднения у начинающих инженерных работников, как правило, возникают на этапе выбора схемы проектируемой системы аспирации, а также при подборе пылеулавливающего оборудования, являющегося наиболее сложным и ресурсоемким решением.

Для получения первичных навыков проектирования современных многоступенчатых аспирационных систем и облегчения подбора их компоновочных схем молодыми специалистами предлагается использование разработанной для этой задачи компьютерной программы, представляющей собой инженерный калькулятор, вычисляющий предполагаемое значение эффективности работы пылеулавливающего оборудования в разветвленных многоступенчатых системах. Применение данного инструмента помимо снижения трудоемкости предварительных расчетов (а во многом и благодаря ему), позволяет

выработать у молодого специалиста навык построения компоновочных схем, отвечающих требованиям, поставленным в техническом задании.

## II. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ

### A. Описание общей архитектуры разрабатываемой системы

Архитектура программы представляет собой совокупность инженерных решений, применяемых при организации ее системы. Для визуального представления общего плана структуры разрабатываемого приложения требуется планирование диаграммы, которая даст подробное представление о связях между различными компонентами системы. Диаграмма классов, в этом случае, представляет собой структурную диаграмму языка моделирования UML [5].

На рис. 1 в графическом виде приведена общая диаграмма классов, примененных для работы с данными о пылеуловителях, выступающих в роли основного пылеулавливающего оборудования проектируемой системы аспирации. Класс, отвечающий за определение характеристик выбранных пылеуловителей, в проектируемом приложении носит название DustCollector.

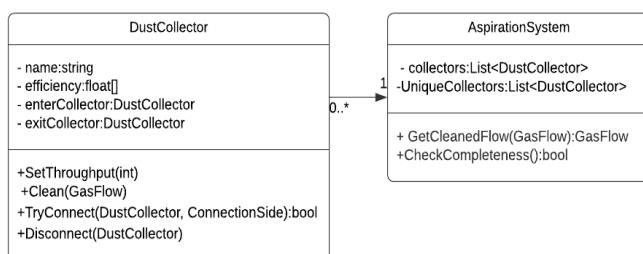


Рис. 1. Диаграмма классов, производящих обработку и хранение информации об пылеуловителях

Класс AspirationSystem является классом, описывающим работу пылеулавливающего оборудования в условиях проектируемой системы. Класс AspirationSystem имеет два поля типа `List<DustCollector>`. Первое поле является общим списком параметров проектируемой системы, второе является списком содержащим экземпляры пылеуловителей, выбранных в качестве основного оборудования, которые могут быть продублированы в первом поле, при наличии необходимости.

На рис. 2 приведена диаграмма классов, применяемых для схематического изображения проектируемой системы на экране.

Основным классом отвечающим за эту операцию является RoomDisplay. Класс DustRoomView является классом обработчиком, назначением которого является обработка взаимодействий пользователя с источником пылевыделения и местными отсосами аспирационной системы, включающей в себя: добавление визуального представления источника пыли;

- удаление визуального представления источника пыли;
- добавление визуализации точки всасывания пылевых частиц;

- удаление визуализации точки всасывания пылевых частиц;
- позиционирование выбранного элемента.

На рис. 3 приведена диаграмма для классов, отвечающих за визуальное представление пылеулавливающего оборудования. Класс Display отвечает за весь функционал по визуализации, преобразуя информацию класса AspirationSystemView в изображение, понятное пользователю. Класс AspirationSystemView обрабатывает все возможные взаимодействия пользователя с модулем основного пылеочистного оборудования:

- 1) добавление визуального представления пылеуловителя;
- 2) удаление визуального представления пылеуловителя;
- 3) перемещение выбранного пылеуловителя;
- 4) создание связей между визуальными представлениями пылеуловителей;
- 5) удаление созданных ранее связей.

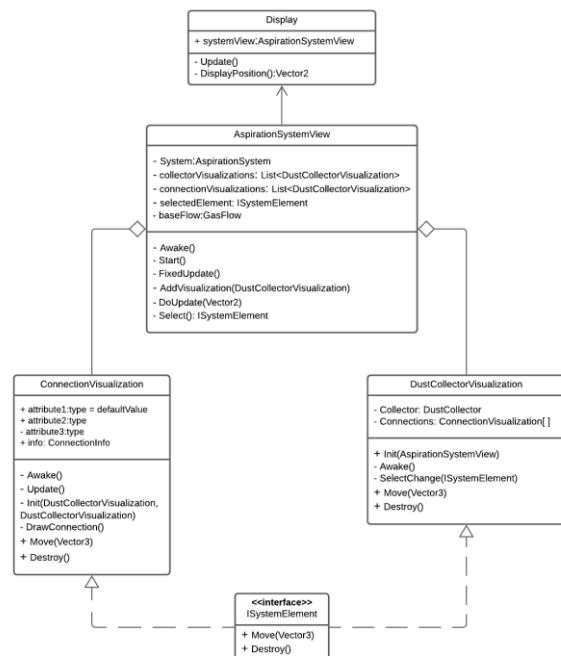


Рис. 2. Диаграмма классов, используемых для визуального представления пылеулавливающего оборудования проектируемой системы

Присутствующие на диаграмме классы `DustCollectorVisualization` и `ConnectionVisualization` введены для построения визуального изображения соединяющих пылеуловители воздуховодов аспирационной сети. Эти классы предназначены для реализации интерфейса `ISystemElement`, описывающего работу основных элементов проектируемой системы.

На рис. 4 приведена диаграмма классов, применяемых для организации взаимодействия пользователя с интерфейсом разрабатываемой программы. Основным классом в данном наборе является класс UI, постоянно вызывающий метод обновления для активного в текущий момент времени элемента интерфейса.

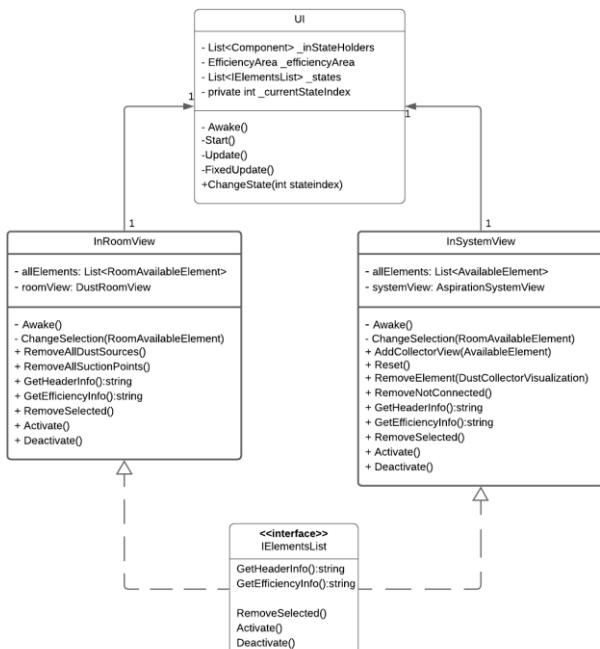


Рис. 3. Диаграмма классов, реализующих функциональное взаимодействие пользователя с интерфейсом приложения

Классы InRoomView и InSystemView представляют собой динамические массивы, обновляемые при добавлении либо удалении элементов выбранной системы. InRoomView работает с представлением очищаемого объема, из которого производится удаление запыленного газа, InSystemView в свою очередь является списком отвечающим за взаимодействие с аспирационной системой. IEElementsList применяется для получения информации отображаемой на экране, а также, позволяет производить активацию и деактивацию выбранных пользователем элементов интерфейса.

#### B. Диаграмма вариантов использования разрабатываемого калькулятора

Диаграмма вариантов использования является базовым концептуальным представлением на всех этапах разработки приложения, ее использование дает возможность показать все имеющиеся варианты его использования. Диаграмма вариантов использования представлена на рис. 5.

Начальным этапом работы с приложением является создание компоновочной схемы проектируемой аспирационной системы. На данном этапе пользователь задает схему аспирационной системы посредством следующего функционала:

- добавление на схему источников пыли;
- добавление на схему точек всасывания пылевых частиц;
- позиционирование добавленных элементов необходимым образом;
- удаление со схемы ненужных элементов.



Рис. 4. Диаграмма вариантов использования разрабатываемого приложения

Затем пользователем производится выбор пылеулавливающего оборудования системы (создание «очистительного» модуля). Для этого подбирается количество и параметры пылеулавливающих аппаратов при помощи следующего функционала:

- добавление на схему источников пыли;
- добавление на схему точек всасывания пылевых частиц;
- позиционирование добавленных элементов необходимым образом;
- удаление со схемы ненужных элементов.

После завершения описания основных параметров проектируемой аспирационной системы, осуществляющей посредством использования вышеописанных модулей, пользователь получает результат, генерируемый модулем определения эффективности. После получения оценки эффективности проектируемой системы, в случае если полученные значения не соответствуют параметрам технического задания, либо представляются недостаточно высокими, пользователь может изменить параметры и конфигурацию системы посредством соответствующего модуля (рис. 5).

### III. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ПРИЛОЖЕНИЯ

#### A. Задание компоновочной схемы системы аспирации и параметров пылеулавливающего оборудования

Описываемый инженерный калькулятор является финальной версией компьютерной программы, созданной для предварительной оценки эффективности различных компоновочных схем многоступенчатых аспирационных систем. Программа реализована посредством языка программирования C# [6, 7] с использованием движка Unity [8].

Список инструментов, которые приложение предоставляет пользователю для моделирования аспирационной системы выбранной компоновочной схемы, следующий:

- моделирование основного пылеулавливающего оборудования системы;
- моделирование компоновочной схемы аспирационной системы.

Исходя из построенной модели проектируемой системы, учитываяющей компоновку и технические характеристики принятого пылеулавливающего оборудования приложение рассчитывает предполагаемое значение общей эффективности улавливания, а также, значения фракционной эффективности (т.е. эффективности улавливания частиц различной крупности).

За отображение выбранной компоновочной схемы на мониторе отвечает специализированный класс RoomDisplay. Регулярное обновление визуального отображения данных в зависимости от действия пользователя реализуется посредством применения метода Update. Полученные данные передаются в класс DustRoomView, который является визуальным представлением для самой системы. Результат работы представлен на рис. 6.



Рис. 5. Исходный экран, отображающий пустую компоновочную схему

Начальный экран содержит два основных элемента, присутствующих в любой системе: Красный прямоугольник в верхней части экрана представляет аспирационную сеть, без присоединенного к ней пылеулавливающего оборудования. Зеленый прямоугольник справа является источником пылевыделения, располагающимся на входе в систему (местным аспирационным отсосом).

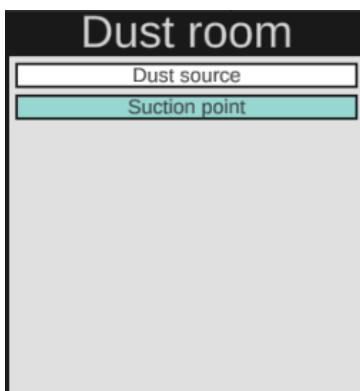


Рис. 6. Визуальное представление динамического списка для хранения информации об источниках пыли и местный точек всасывания

Для отображения на экране активных в текущий момент времени элементов аспирационной системы использован класс InRoomView (рис. 4) [9], реализующий следующие задачи:

- отображение полного списка элементов системы;
- выделение выбранного элемента системы;

- активация дочерних элементов системы;
- деактивация дочерних элементов системы.

Финальное визуальное представление показано на рис. 7. На изображении представлены два элемента – источник пылевыделения, и точка всасывания.

Визуализация комплекса пылеулавливающего оборудования производится посредством использования класса InSystemView, хранящем ссылку на класс визуализации (рис. 13), решающем задачи:

- отображение элементов в системе;
- выделение выбранного элемента системы;
- активация дочерних элементов системы;
- деактивация дочерних элементов системы.

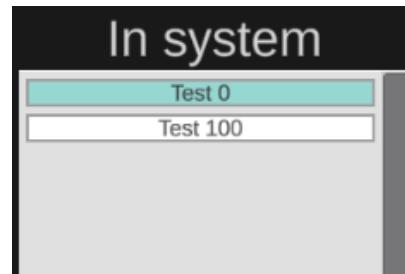


Рис. 7. Список добавленных в очистительную систему элементов

Помимо списка элементов, содержащихся самой системой в разрабатываемом приложении, присутствует список элементов, доступных для самостоятельного добавления, реализуемый классом AvailableToAddView, выполняющий задачи:

- отображение доступных для добавления в систему элементов;
- выделение уникального элемента системы;
- добавление в систему выбранного элемента.

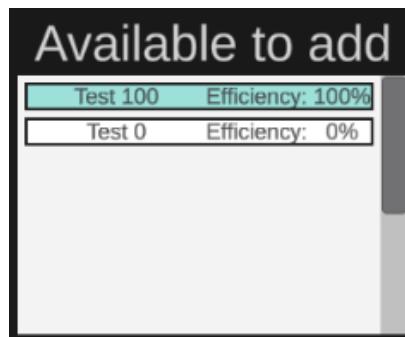


Рис. 8. Список доступных для добавления в систему элементов

На рис. 9 приведено начальное состояние системы, в котором для выбора доступны два уникальных типа единиц пылеулавливающего оборудования с эффективностью очистки 100 % и 0 %. В процессе создания нового типа пылеуловителя требуется ввести его характеристики. Окно используемое для создания нового типа пылеуловителя приведено на рис. 10.

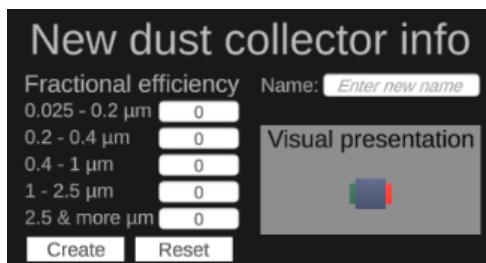


Рис. 9. Интерфейс окна создания нового типа пылеуловителя с визуальным представлением элемента в системе

На рис. 11 представлен экран, предназначенный для работы с комплексом пылеулавливающего оборудования.



Рис. 10. Экран модуля пылеулавливающего оборудования после добавления элементов

Для определения величины общей эффективности пылеулавливающего оборудования отдельные элементы нужно соединить в требуемой последовательности (последовательно или параллельно), как это продемонстрировано на рис. 12.

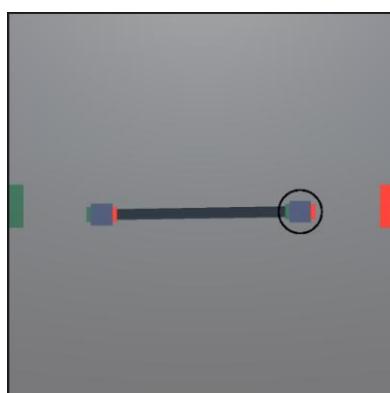


Рис. 11. Соединение двух элементов очистительной системы

Для создания компоновочной схемы необходимо произвести расстановку источников пылевыделения и всасывающих элементов системы аспирации (рис. 13). Серый квадрат, изображенный в левой части экрана является источником пылевыделения, а точка всасывания (местный аспирационный отсос) изображена концентрическими кругами зеленого и коричневого цвета. Зеленым выделена область эффективного всасывания (для аспирации открытых источников пылевыделения).

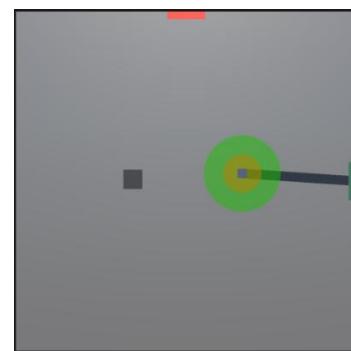


Рис. 12. Экран для представления компоновочной схемы аспирационной системы с двумя элементами

#### B. Расчет параметров выбранной компоновочной схемы

Расчет эффективности работы основного пылеулавливающего оборудования системы аспирации осуществляется классом EfficiencyCalculator. Расчет производится посредством сопоставления массы пылевых частиц содержащихся во входящем в систему и выходящем из нее газопылевых потоках.

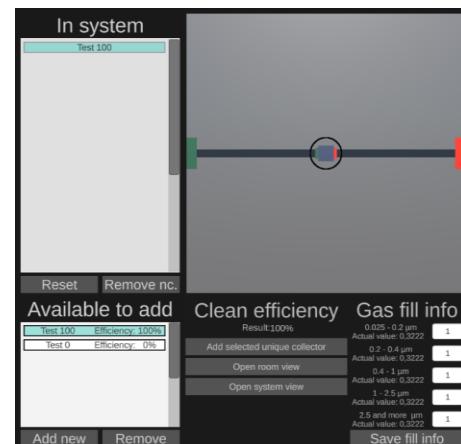


Рис. 13. Конечный экран приложения

После завершения конфигурирования компоновочной схемы системы, производится автоматический пересчет параметра эффективности системы. На рис. 14 представлен экран приложения, генерируемый по завершении расчета эффективности системы с одним пылеуловителем. В окне «Clean efficiency» приведена суммарная эффективность смоделированной системы.

Помимо оценки эффективности работы основного пылеулавливающего оборудования разработанное приложение позволяет также произвести оценку такого важного параметра как эффективность пылеудаления открытого аспирационного зонта, при обсыпывании открытых источников пылевыделения [10-12]. Расчет эффективности аспирирования производится при добавлении в компоновочную схему системы дополнительного всасывающего элемента (рис. 15).

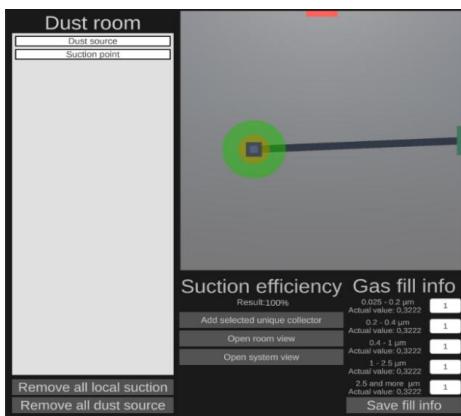


Рис. 14. Конечный экран приложения в режиме расчета эффективности всасывания

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный инженерный калькулятор, являющийся компьютерной программой, позволяющей осуществлять экспресс расчеты основных параметров работы инженерно-экологических систем очистки газопылевых выбросов промышленных предприятий, является удобным инструментом, позволяющим привить начальные навыки будущим инженерам проектировщикам. Круг задач, решаемый представленным приложением, за счет автоматизации сложных итерационных методов расчета, неизбежно сопутствующих определению эффективности работы систем аспирации, позволяет выработать профессиональные навыки экспрессоценки, совершенно необходимые начинающим проектировщикам промышленных инженерно-экологических систем. При использовании данного программного комплекса, у обучающегося появляется ценная возможность сопоставления большого количества сложных разветвленных многоступенчатых компоновочных схем промышленных систем аспирации в течении небольшого периода времени. Важным отличием предлагаемого приложения является простота и быстрота его использования, которой не обладают современные мощные и высокоспециализированные программные продукты, предназначены для проектирования инженерных систем, использование которых требует существенных затрат времени и ресурсов. Данные полнофункциональные системы, как правило, не рассчитаны на проведение экспрессооценок, и не имеют соответствующих инструментов, что затрудняет их ис-

пользование в учебных целях. Учитывая несомненную полезность таких экспрессинструментов, представляется целесообразным их включение в имеющиеся специализированные пакеты инженерных проектно-вычислительных комплексов в будущем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации: монография. – СПб.: Химиздат, 2005. – 659 с. – ISBN 5-93808-051-9.
2. Боровков Д.П., Сидякин П.А., Бурда И.В., Экба С.И. Исследование по оптимизации характеристик верхнего ввода пылеуловителей со встречными закрученными потоками // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 11-5. – С. 866-870.
3. Сидякин П.А., Экба С.И., Семенова Е.А., Боровков Д.П., Маринин Н.А. Совершенствование систем обеспыливания на предприятиях деревообрабатывающей отрасли // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 11 (133). – С. 67-70.
4. Экба С.И., Сидякин П.А., Боровков Д.П., Азаров Д.В. Экспериментальные исследования эффективности очистки древесной пыли на предприятиях строительной индустрии пылеуловителями на встречных закрученных потоках Современная наука и инновации. – 2013. – № 2 (2). – С. 12-18.
5. Bass L., Clements P., Kazman R. Software Architecture in Practice. – 3 edition (October 5, 2012). – 2012. – 640 с. – ISBN: 978-0321815736.
6. C# 7 и .NET Core. Кроссплатформенная разработка для профессионалов. – М. Прайс. - Питер, 2018. – 640 с. – ISBN: 978-5-4461-0516-8.
7. C# Documentation: официальный сайт. – Обновляется ежемес. – URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/csharp/> (дата обращения: 18.05.2021).
8. Unity Documentation : официальный сайт. – Обновляется ежемес. – URL: <https://docs.unity3d.com/ru/current/ScriptReference/index.html> (дата обращения: 18.05.2021).
9. Либерти Д. Язык программирования С#. – СПб., 2003. Символ-Плюс. – С. 26. – 688 с. – ISBN: 5-93286-038-3.
10. Азаров В.Н., Сидякин П.А., Экба С.И., Семенова Е.А., Боровков Д.П. Обеспечение безопасности воздушной среды помещений по производству деревянных строительных конструкций Интернет-вестник ВолГАСУ. – 2013. – № 2 (27). – С. 35.
11. Сергина Н.М., Боровков Д.П., Семенова Е.А. Совершенствование методов очистки воздуха рабочей зоны от пыли известкового щебня, выделяющейся при разгрузке железнодорожных вагонов // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 4-2 (23). – С. 105.
12. Азаров В.Н., Боровков Д.П., Филиппова С.В. О транспортировании пылевых частиц закрученными потоками в воздуховодах систем аспирации и обеспыливающей вентиляции // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – № 3-1 (42). – С. 113-119.

# Аспекты реализации образовательной программы по направлению подготовки «Корабельное вооружение» в Южном федеральном университете

**Величко Сергей Владимирович**  
Институт компьютерных технологий  
и информационной безопасности  
Южный федеральный университет  
Таганрог, Россия  
*SVVelichko@sfedu.ru*

**Аннотация.** Цель образовательной программы, – подготовка высококвалифицированных инженерных кадров для предприятий Объединённой судостроительной корпорации. Структура образовательной программы ориентирована на компетентностную модель. Образовательная программа состоит из модулей общекомпетентских и специальных дисциплин. Концепция и структура образовательной программы ориентированы на всемирную инициативу CDIO. Практика применения SMART-технологий в образовательном процессе.

**Abstract.** The educational program objective is to train highly qualified engineering personnel for companies of the United Shipbuilding Corporation (USC). The structure of the educational program is aligned with competence model. The educational program consists of modules of general education and special disciplines. The concept and structure of the educational program are focused on the worldwide CDIO initiative as well as using of smart technologies in the educational process.

**Ключевые слова:** образовательная программа, компетентностная модель, практика применения SMART-технологий в образовательном процессе, подводные робототехнические системы, «данные»-информация-знания, информационно-управляющая система, интерактивное обучение.

**Keywords:** educational program, competency-based model, practice of using SMART technologies in the educational process, underwater robotic systems, data-information-knowledge, information-control system, interactive learning.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Направление образовательной программы связано с разработкой и проектированием информационно-управляющих систем кораблей и подводной морской техники, информационно-управляющих систем морской робототехники, исследованием физических полей морских объектов, вопросами электронной схемотехники, цифровой обработки гидроакустических сигналов, корабельной автоматики, прикладного программирования, разработки специального программного обеспечения микропроцессоров, микроконтроллеров и микропроцессорных систем для автономных подводных аппаратов и роботов.

Цель образовательной программы, – подготовка высококвалифицированных инженерных кадров для предприятий Объединённой судостроительной корпорации, способных повышать конкурентоспособность предприятий судостроительной отрасли за счет использования передовых инфокоммуникационных технологий при разработке, производстве, сопровождении, модернизации и замене (вывода из эксплуатации) оборудования надводных и подводных кораблей, в том числе подводных робототехнических комплексов.

Подготовка бакалавров по направлению 17.03.01 Корабельное вооружение ведется в 3-х вузах страны, два из которых расположены в Санкт-Петербурге. Программа, которая предлагается Институтом компьютерных технологий и информационной безопасности (ИКТИБ), будет ориентирована на разработку, производство, сопровождение и модернизацию информационно-управляющих систем кораблей и подводной робототехники. В рамках данной программы, за счет сочетания имеющегося у института опыта подготовки специалистов в области информационных технологий, информационной безопасности и системной инженерии, развивающейся материально-технической базы института, проводимых исследований сотрудниками института, будет реализовывать новый междисциплинарный профиль подготовки специалистов «Информационно-управляющие системы кораблей и подводной робототехники».

Структура образовательной программы ориентирована на компетентностную модель федерального государственного образовательного стандарта по направлению 17.03.01 Корабельное вооружение. Образовательная программа состоит из модулей общекомпетентских и специальных дисциплин. Концепция и структура образовательной программы ориентированы на всемирную инициативу CDIO, на сформулированные в ней требования к результатам обучения, на требования профессионального стандарта инженера-системотехника и описание профессии будущего инженера-разработчика бортовых информационно-управляющих систем.

Для успешной реализации инициативы CDIO или модели «4П», «Планировать – Проектировать – Производить – Применять», целесообразно глубже проникнуть в предметную область образовательной программы, освоив её тезаурус. Научиться мыслить в категориях морских технологий и подводного роботостроения.

Обучение есть формирование преподавателем тезауруса студента. Формирование тезауруса стадийно. Тезаурус содержит консервативную (редко/малоизменяющую) и вариативную, поисковую, первичную части. Первая стадия формирование нового объекта-элемента тезауруса, включающая определение элемента, классификация, описание его свойств, функций.

Представлять и понимать значимость навигации, гидродинамики, подводного судостроения, миссии робототехнического комплекса (РТК).

В настоящее время в мировой практике накоплен значительный методологический и практический опыт создания и использования подводных робототехнических систем для решения научно-исследовательских и прикладных задач в интересах различных отраслей. Прогресс в данной области заключается в создании более совершенных систем, технологий и многофункциональных комплексов, обеспечивающих решение широкого спектра задач в условиях сложной подводной среды.

К числу наиболее актуальных из этих задач относятся: общие виды работ, поиск и разведка промысловых объектов, геологические и геофизические исследования, биологические исследования, гидрофизические исследования.

Опыт создания автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) показывает, что существенный прогресс в данной области возможен только при широкой кооперации, учитывающей все аспекты научно-технического, технологического и производственного взаимодействия.

Развитие приоритетных направлений в подводной робототехнике предполагает разработку системных архитектур, моделей и методов интеллектуального управления и ориентирования в пространстве, обеспечивающих безопасность и «живучесть» автономных подводных роботов при работе в неопределенных и экстремальных условиях среды. Первостепенное значение имеет оптимальное решение задач навигации и управления на основе интегральной обработки всей имеющейся информации о среде и состоянии подводного робота.

Развитие робототехнического комплекса напрямую зависит от технологической основы, способной реагировать на все возрастающие требования к тактико-техническим и функциональным характеристикам аппаратов и их систем. В этом отношении имеющийся опыт применения модульной технологии, конечно, нельзя приумножить, однако и он требует соответствующего анализа и обобщения с учетом мировых тенденций.

Важный аспект в современном развитии АНПА связан с вполне объяснимым стремлением к миниатюризации электронных систем и аппаратов в целом. В архитектуре малоразмерных аппаратов и их систем широкое применение находят микроэлектронные структуры и технологии. Особенно актуальной данная проблема выглядит при серийном производстве малых аппаратов,

предназначенных для проведения работ в пределах небольших глубин. Миниатюризация отдельных электронных (микропроцессорных, сенсорных и исполнительных) устройств актуальна для аппаратов любого типа, однако во многих случаях при создании глубоководных аппаратов существуют пределы миниатюризации, обусловленные заданными тактико-техническими требованиями. Тем не менее, при создании специализированных подводных роботов, решающих ограниченный класс задач, прогресс может быть особенно ощутим. Созданные в последние годы автономные подводные роботы уже могут служить прототипами для «интеллектуальных» аппаратов следующего поколения [2].

В процессе обучения это может называться «новый материал, контент». В этом случае каждый новый элемент тезауруса есть «термин». Соответственно, одновременно или ранее вводятся иерархии «свойств», «функций» и «классов», содержащие «элементы». При наличии в тезаурусе нескольких объектов, становится возможным формирование нового элемента тезауруса вида – «связь объектов». При связывании объектов возможно образование «макрообъектов», которые будут являться «объектами» вышестоящего уровня (системами) [6].

Для превращения «данных» в «информацию» необходим шаг, называемый «присвоение контекста», «интерпретация», «космысление». По присвоению данным контекста происходит переход на следующий уровень иерархии взаимопревращений «данные»-«информация»-«знания». Необходимыми и достаточными условиями этого является наличие объекта (органа, системы), осуществляющего этот акт превращения. Такими объектами являются - мозг человека или программа для компьютера. Обе эти системы включают Тезаурус, необходимый и в том, и в другом случае. После присвоения контекста и анализа возможных ошибок происходит «понимание» данных или, иначе говоря, «прием» информации.

Задачи сегодняшнего преподавателя – динамично систематизировать, структурировать, обновлять учебный материал и его дидактическую оснастку. Сжимать, без потери контента, оцифровывать, ранжировать другими медиа. Затем, медленно изучать материал на предмет – дозирования и последовательности подачи. Далее, еще медленнее, проанализировать материал оперируя связками – «общее-частное», «часть-целое», «причина-следствие», «термин-определение», «объект-свойства», «объекты-процессы», «от простого – к сложному» и нет ли использования, оперирования понятиями, которые еще не определены, не дефинированы [13].

Введение в специальность регламентировано дисциплиной «Объекты морской техники», на которой студенты должны «вживаться в образ» исследователя морских глубин. Тезаурусы преподавателя и студента должны быть синхронизованы, реплицированы, т.е. равны для текущего контекста данных. Студент должен стать коллегой, соратником, другом в решении задачи освоения программы, т.е. быть мотивированнымmotivированным на решение творческих задач подводного роботостроения.

Реализация возможна при использовании ресурсов «Internet», электронных библиотек, дистанционно-обучающих систем «МООС», «Moodle», и т.д.

Moodle – система управления курсами (электронное обучение), также известная как система управления обучения или виртуальная обучающая среда. Moodle является аббревиатурой от английского Modular

Object-Oriented Dynamic Learning Environment (модульная объектно-ориентированная динамическая среда) [6].

Система Moodle включает ресурсы, задания, опрос, чат, тест, файлы. Ресурсы – это информация, которую мы хотим дать в своем курсе. Ресурсы также поддерживают любой контент в электронном виде. Они могут быть за-качаны преподавателем или храниться на сервере.

При реализации программы применяются дистанционные технологии и электронное обучение. Институтом развернута собственная система дистанционного обучения, позволяющая осуществлять постоянное взаимодействие преподавателя со студентами, контроль самостоятельной работы студентов, формировать электронное портфолио студентов и получать независимые рецензии на работы студентов. ИКТИБ первым начал внедрять технологии электронного обучения в образовательный процесс. В рамках образовательной программы ряд дисциплин предполагается реализовывать с применением технологий электронного обучения.

В ИКТИБ функционирует проектный офис, который организует проектную деятельность студентов, начиная с 1 курса. В рамках образовательной программы предусмотрено выполнение 3 проектов, которые будут выполняться под руководством проектного офиса ИКТИБ. Основным принципом организации проектной деятельности в ИКТИБ является формирование междисциплинарных проектов, реализуемых командами студентов, обучающихся на разных направлениях подготовки. При этом к процессу формирования тематики проектов и оценки результатов выполнения проекта привлекаются представители профильных предприятий. ИКТИБ обладает всей необходимой ресурсной базой для успешной реализации программы подготовки бакалавров в области проектирования информационно-управляющих систем кораблей и подводной робототехники, кроме того с целью более углубленного изучения прикладных аспектов систем будет привлекаться материально-техническая база предприятий-партнеров во время прохождения студентами практик на предприятиях и выполнения ими творческого проекта и выпускной квалификационной работы.

Тематика выпускных квалификационных работ будет направлена на решение конкретных задач, стоящих перед предприятиями-партнерами, на преодоление технологических барьеров НТИ по приоритетным группам направлений в области разработки перспективных образцов подводной робототехники; создания пилотной зоны цифровой навигации и реализация пилотного проекта по разработке и внедрению комплексных решений для цифровой навигации; создания прототипа автоматизированной системы навигации «судно–берег»; создания типовой индивидуальной системы поддержки принятия решений для лоцманов, сопряженной с информационной базой СУДС (система управления движением судов) и портовых служб; создания унифицированной компонентной базы инфраструктуры берегового мониторинга.

В ИКТИБ регулярно осуществляется анкетирование обучающихся с целью определения уровня удовлетво-

ренности обучающихся по получению необходимых знаний и умений, условиям реализации образовательных программ.

Для реализации образовательной программы планируется привлечение представителей профильных предприятий, входящие в Объединённую судостроительную корпорацию.

Практика применения этих методов на занятиях с бакалаврами направления «Корабельное Вооружение» не мыслится без SMART-технологий.

Задача устранения противоречия между теорией и практикой решается повышением интереса к содержанию учебного курса, что важно в процессе всех видов учебной деятельности. Для этого, например, прямая информативная логика лекции изменяется так, чтобы очередное логическое звено было завершено маленьким открытием, умозаключением, сформированным самими студентами.

Углубленное изучение материала лекций продолжается на лабораторных занятиях. При выполнении лабораторных работ формируются компетенции производственно-технологической, организационно-управленческой, сервисно-эксплуатационной деятельности. В этом случае применим метод коллективного минипроекта, так как сама практическая деятельность на таком занятии предполагает и теоретическую подготовку, и реальный результат, и работу в малых группах. Но реализация алгоритма «знать – уметь – владеть» не срабатывает уже на первом этапе: проваливается звено «знать». Это чаще всего происходит в случае обращения студентов к SMART-ресурсам Интернета низкого качества, разрозненных и бессистемных. Причина – отсутствие бесплатной интерактивной базы знаний по предмету. В процессе защиты лабораторной работы теория по традиции проверяется практикой, но облекается в форму образовательных игр, имитаций, анализа казусов, мозгового штурма. Инфопродукт, необходимость которого формируется в процессе применения перечисленных интерактивных методов, может быть продемонстрирован на семинарских занятиях или использован как доступное средство обучения.

В реализуемой программе подготовки «Корабельное вооружение» прорабатывается синтез образовательных платформ традиционной школы и школы компетенций, который реализуется в форме профильных инновационных кластеров. Организация подобных кластеров обеспечивает подготовку профессиональных специалистов, способных осуществлять деятельность в сфере развития и управления инновациями в различных областях знаний.

Отметим, что существуют различные авторские трактовки понятия «competentia», но все они отражают некоторые сущностные основы – высокой способности совершать определенные акты или действия в конкретных условиях, круг полномочий, умений.

Реализация ФГОС нового поколения требует высокого уровня развития профессиональных компетенций (ПК) будущих бакалавров, что требует слаженной работы на разных уровнях (кафедра, институт, университет) при определенной логике содержания, форм и методов работы. Создаются условия для участия студентов в конкретной деятельности на основе полученных теоре-

тических знаний. Методическая работа направляется и корректируется коллективом кафедры, где обсуждаются и анализируются вопросы совершенствования профессиональных компетенций, происходит обмен опытом, ведется консультационно-методическая поддержка.

Большое значение отводится специальным методам развития профессиональных компетенций: дискуссионным, эвристическим, информационным. Элементы дискуссии, спора, столкновения позиций, преднамеренного заострения и даже преувеличения противоречий в обсуждаемом химическом материале могут быть использованы почти в любых организационных формах обучения, включая лекции. Дискуссионные методы порождают новые мотивы деятельности, выступают в качестве метода и средства не только профессиональной подготовки, но и профессионального воспитания, что особенно важно.

Для успешной реализации образовательной программы необходимо:

Создание научно-исследовательской лаборатории ИУС (НИЛ ИУС), позволяющей осуществлять разработку имитационных моделей для статистических исследований эффективности автоматизированных корабельных комплексов (АКК) и информационно-управляющих систем (ИУС) РТК НИЛ ИУС для:

- разработки стендов тестирования и испытания АКК и ИУС РТК;
- разработки компьютерных обучающих систем, учебно-действующих моделей и тренажёров.
- разработка алгоритмического и программного обеспечения АКК и ИУС РТК;

Основная цель создания лаборатории – решение актуальных опытно-конструкторских и научно-исследовательских задач в области информационно-телекоммуникационных технологий и управляемых систем, проведение фундаментальных и прикладных научных исследований.

Оборудование НИЛ ИУС распределённым моделирующим комплексом для отладки и комплексного тестирования программного обеспечения подводного робота, решает задачи

информационного обеспечения задач управления АНПА, методике использования системы технического зрения в судостроении, моделирования этапов проектирования и эксплуатации компьютерной системы подводного робота. При помощи программного обеспечения становится возможно осуществлять:

планирование миссии – разработка пользователем плана миссии для АНПА;

работу и управление – пользователь наблюдает за работой АНПА и имеет возможность вмешаться в его работу; просмотра миссии и анализа – сбор данных, обработка и презентация, пользователь работает с данными, собранными во время миссии АНПА.

Информационно-управляющая система (ИУС) АНПА должна обладать развитыми возможностями формирования поведения АНПА и гибкого наращивания функциональности по мере появления новых задач обследо-

вания и бортовых сенсоров. Программно-алгоритмический интеллект робота должен обеспечивать формирование и отработку рабочих миссий, автоматическое планирование траектории его движения в условиях априори неизвестной обстановки, обход препятствий и др. До установки на борт АНПА все функции и алгоритмы работы этой системы должны быть тщательно протестированы. Эффективным средством достижения этой цели является моделирующий программно-аппаратный комплекс (МК), использование которого позволяет сократить организационные, финансовые и временные затраты на проведение натурных испытаний. Подобные комплексы позволяют проводить проверку методов планирования траекторий и организации движения АНПА с учетом функциональных возможностей последнего, его динамических и кинематических свойств, целевого назначения и характеристик подводной обстановки [3].

Одна из задач НИЛ ИУС разработка симуляторов АНПА, ТНПА. Тестирование и отладка реального оборудования является трудоемкой задачей. В частности, в случае водных роботов, необходимо каждый раз проводить транспортировку и развертывания робота на воде. Проведение экспериментов с еще не полностью функциональным прототипом водного робота, оснащенным дорогостоящим

оборудованием, также весьма рискованно. В связи с этим, использование симуляторов является необходимым для ускорения разработки робототехнических систем и при этом является доступным с точки зрения трудозатрат и стоимости экспериментов.

Обязательным условием успешной деятельности НИЛ ИУС должны стать опытные образцы, учебные и учебно-разрезные макеты АНПА, ТНПА, БИНС, материальная база ИУС. Оснащение НИЛ ИУС робототехническими комплексами: ММТ-300, ТНПА, Gnom-pro, гайдером, подводным дроном, позволит активизировать образовательный процесс и существенно расширить возможности творческого подхода к пониманию суть проблем морской робототехники.

Необходимым составным элементом НИЛ ИУС должны быть: опытные бассейны, кавитационные трубы и гидролотки. Некоторые частные задачи проблемы мореходности могут решаться в бассейнах с движением модели, параллельным его длинной стороне. В этих же бассейнах могут проводиться исследования и отладка взаимодействия двигательно- – рулевого комплекса, элементов миссии, вопросов удифферентовки, стабильности удержания заданных режимов движения АНПА.

На данный момент наиболее распространены следующие виды определения ходовых характеристик подводных аппаратов при проектировании:

- виртуальная продувка с использованием пакетов прикладных программ систем САЕ;
- математическое моделирование;
- испытание аппарата на водном полигоне;
- продувка в аэродинамической трубе.

Аналитические и вычислительные операции при исследовании динамики АНПА включают следующие основные элементы:

- построение трехмерной визуализированной модели аппарата,
- гидродинамический расчет модели,
- определение параметров движения,
- анализ критериев устойчивости,
- оптимизация динамических процессов с учетом требований по устойчивости и точности управления.

Инновационные технологии помогают не только увеличить академическую мобильность, интеграцию в систему мирового научно-образовательного пространства, создать оптимальные в экономическом плане образовательные системы, повысить уровень образовательной корпоративности, но и усилить связи между ветвями образования разного уровня. В приоритете остаётся не накопление большого объёма знаний, а умение их использовать в повседневной жизни [2].

Понятие «инновация» – от латинского *innovation* – означает изменение, обновление, нововведение и имеет два аспекта – новшество и внедрение этого новшества в определённый процесс, в частности, – в педагогический. Все педагогические инновационные процессы обозначаются понятиями «нововведение», «новшество», «инновация» и означают инновационные процессы в целом во всей системе образования [3].

Инновационными технологиями в обучении считают не только применение интерактивных технологий в обучении, но и технологии проектного обучения, а также внедрение в образовательный процесс компьютерных технологий [9].

Интерактивным обучением называется образовательный процесс, основанный на психологии развития человеческих взаимоотношений и рассматриваемый как способ усвоения знаний благодаря творческому, продуктивному мышлению, поведению и общению, а также формирования при этом навыков и умений через взаимоотношения и взаимодействие педагога и обучаемых. Процесс обучения должен быть организован так, чтобы обучаемые учились общаться, критически мыслить, а также решать поставленные проблемы путём анализа различных ситуаций или ситуационных задач и соответственной предложенной информацией. Применение интерактивных технологий в обучении позволяют преподавателю и обучаемым меняться ролями [5]. Инновационные технологии – это инструмент претворения новых образовательных форм и методов в жизнь.

Информационные технологии в тесной связи с коммуникационными позволяют модернизировать образовательный процесс и реализовать основные образовательные задачи, ориентировать учебный процесс на реализацию потенциальных возможностей человека, готовить обучающихся к практическому применению полученных знаний и умений в жизни.

Федерального государственного образовательного стандарта по направлению подготовки 17.03.01 «Корабельное вооружение» (уровень бакалавриата), определяемое дидактическими единицами.

В разных высших учебных заведениях Российской Федерации специалистами сформулированы свои требования к электронным курсам и принципам их построения. В свою очередь, считаем необходимым остановиться на следующих требованиях:

- экономичность: технология производства курса должна быть недорогой и обеспечивать его создание и обновление в короткое время;
- интерфейс, приближенный к обычным лекциям: для облегчения восприятия учебного материала обучающимися при создании онлайн-курсов необходи́ма разработка интерфейсной оболочки, ассоциирующейся с традиционными элементами учебного процесса (аудитория, доска, присутствие преподавателя);
- индивидуализация обучения;
- модульность: конструирование учебных программ с учетом уровня подготовки обучающегося и его потребностей;
- ориентация на открытые интернет-стандарты для представления материалов курса в целях облегчить процедуру доставки курса до обучающегося;

В качестве главных принципов построения электронных курсов можно выделить следующие: прозрачная логика и структурированность материала; функциональность и простота элементов оформления (форма подачи материала не должна отвлекать от содержания); привлекательность и удобство в использовании, четкое деление визуального ряда на логические и функциональные зоны (навигационные элементы, заголовки, основная информация, комментарий, выводы и т. п.); разумный подход в применении дополнительных мультимедийных средств (использование аудио- и видеофрагментов, элементов анимации и т.п.).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении и введении в действие образовательного стандарта высшего образования Южного федерального образования по направлению подготовки 17.03.01 Корабельное Вооружение (квалификация (степень) «бакалавр»): Приказ Ректора ЮФУ от «02» января 2020 г. № 57-ОД.
2. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение [отв.ред. Л.В. Киселев]; ФГБУН Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН. – Владивосток, 2018. – 368 с.
3. Бахарев, В.В., Карапасев, А.В., Карапасев Г.В. Использование АНПА в процессе изучения мирового океана. – УДК 629.127.4-52:62.501.55-531.501.
4. Веселов Г.Е. Концепция образовательной программы бакалавриата по направлению 17.03.01 Корабельное вооружение. – Таганрог: ЮФУ, 2019.
5. Всемирная инициатива CDIO. Стандарты: информационно-методическое издание / пер. с анг. и ред. А.И. Чучалина, Т.С. Петровской, Е.С. Кулокиной; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического универ-ситета, 2011. – 17 с.
6. Дистанционное обучение: учебное пособие для ВУЗов. – М.: Владос, 2008. – 192 с.
7. Хуторской А.В. Компетентностный подход в обучении. – М.: Изд-во «Эйдос», 2013. – 73 с.

8. Самари Ш.М. Пути применения дистанционного обучения в системе образования // Аспирант и соискатель. – 2009. – № 5. – С. 84 - 88.
9. Применение инновационных технологий в учебном процессе общеобразовательного учреждения // Молодежный научный форум: Гуманитарные науки: электр. сб. ст. по материалам XIII студ. междунар. заочной науч.-практ. конф. – М.: МЦНО, 2014. – № 6 (13). – URL: [http://nauchforum.ru/archive/MNF\\_humanities/6\(13\).pdf](http://nauchforum.ru/archive/MNF_humanities/6(13).pdf).
10. Селемнев С.В. Как в электронной форме представить: учебное содержание? Дистанционное и виртуальное обучение. – 2010. – № 1. – С. 94-104.
11. Шевчук В.П. Методика дистанционного обучения // Информатика и образование. – 2007. – № 12. – С. 118-119.
12. Белозубов А.В., Николаев Д.Г. Система дистанционного обучения Moodle: учебно-методическое пособие. – СПбГУ, 2009. – 107 с. URL: [http://www.altstu.ru/media/f/posobie\\_Moodle.pdf](http://www.altstu.ru/media/f/posobie_Moodle.pdf)
13. Лавров О.А. Обучение как передача знаний. Техно-философское задание к размышлению Центр обучения SVS-L, Кохтла-Ярве, Эстония..

*Научное издание*

Сборник научных трудов

**XI Всероссийская  
научная конференция**

**«СИСТЕМНЫЙ СИНТЕЗ И ПРИКЛАДНАЯ СИНЕРГЕТИКА»**

Подписано в печать 31.01.2023 г.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Формат 60×84 1/8.

Усл. печ. лист. 51,0. Уч. изд. л. 41,7. Заказ 8899.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции

Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.

344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Ставки, 200/1, тел (863) 243-41-66.