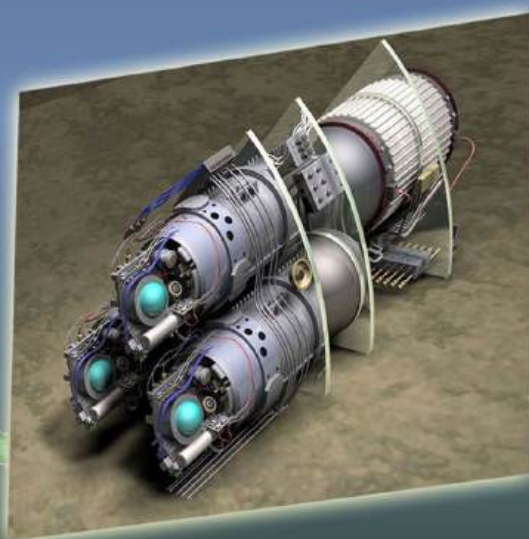
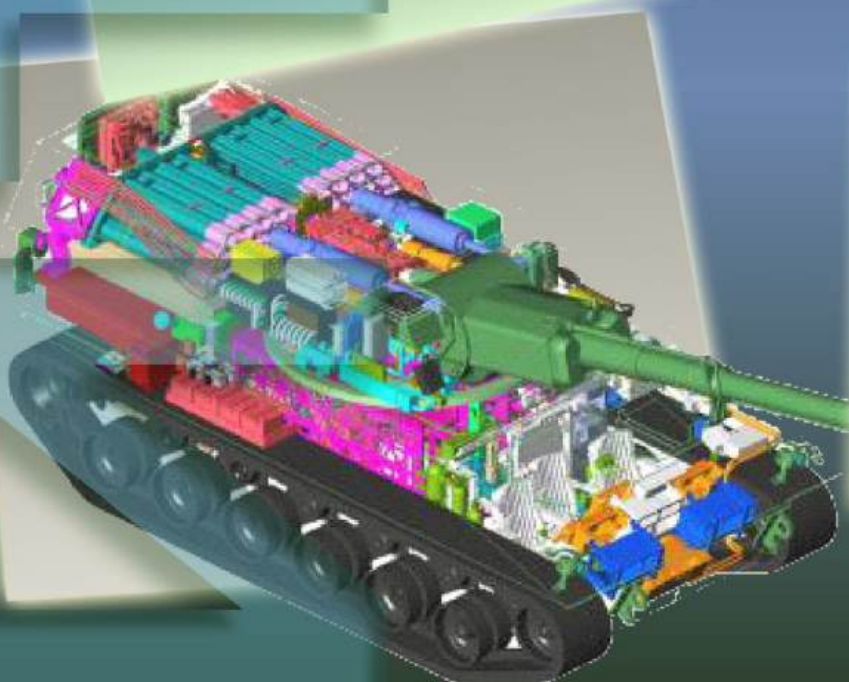
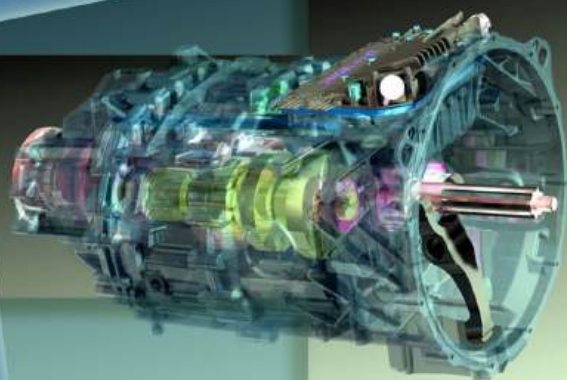
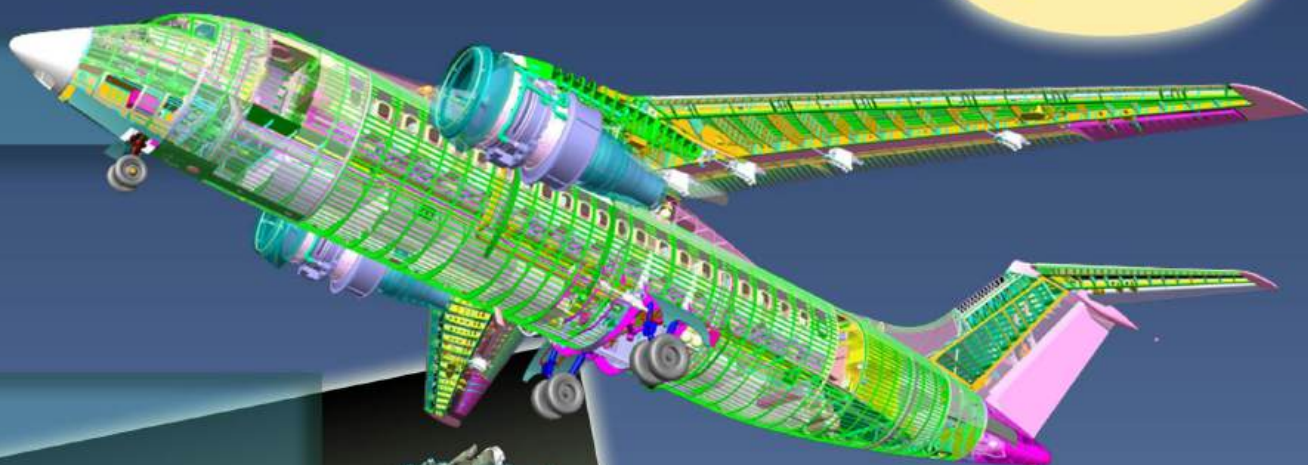


ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

в проектировании и производстве

№ 4' 2021





Все новейшие достижения и современные разработки предприятий оборонного комплекса — в научно-технических журналах ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» является издателем следующих научных журналов:



Межотраслевой научно-технический журнал
Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России
(4 выпуска)
Подписной индекс **79379**
Издается с 1984 года



Межотраслевой научно-технический журнал
Конструкции из композиционных материалов
(4 выпуска)
Подписной индекс **80089**
Издается с 1981 года



Научно-технический журнал
Информационные технологии в проектировании и производстве
(4 выпуска)
Подписной индекс **79378**
Издается с 1976 года



Межотраслевой научно-практический журнал
Экология промышленного производства
(4 выпуска)
Подписной индекс **80090**
Издается с 1993 года



Научно-практический журнал
Вопросы защиты информации
(4 выпуска)
Подписной индекс **79187**
Издается с 1974 года

Все издания ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»:

✓ включены решением ВАК Министерства науки и высшего образования России в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук;

✓ метаданные выпусков включены в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Более подробную информацию об изданиях, подписке, дополнительных услугах можно получить по тел.: 8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-67, 8 (495) 491-77-20 (подписка);
факс: 8 (495) 491-44-80.
E-mail: izdanie@ntckompas.ru

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
ОБОРОННОГО КОМПЛЕКСА
«КОМПАС»

№ 4 (184) 2021

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1976 г.

Главный редактор

И. А. Шеремет, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., заместитель директора Российского фонда фундаментальных исследований по научной работе

Заместитель главного редактора

В. Н. Гридин, д-р техн. наук, проф., научный руководитель ЦИТИ РАН

Ответственный секретарь

Г. П. Глотова, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

Редакционная коллегия:

В. В. Бордюже, д-р техн. наук, проф., Координационный совет по информационным технологиям предприятий ОПК РФ; А. И. Громов, канд. хим. наук, НИУ «Высшая школа экономики»; В. В. Кондратьев, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., Нижегородский государственный технический университет им. Р. А. Алексеева; Ю. Н. Кофанов, д-р техн. наук, проф., МИЭМ НИУ ВШЭ; С. А. Матвеев, канд. техн. наук, ФГУП «ЦНИИмаш»; Е. И. Митрушкин, д-р техн. наук, проф., АО «НИИИА»; С. В. Назаров, д-р техн. наук, проф., ЗАО «Московский научно-исследовательский телевизионный институт»; М. А. Пирогова, канд. техн. наук, НИУ МЭИ; С. В. Попов, д-р техн. наук, Холдинг «Швабе»; А. Ф. Ронжин, д-р физ.-мат. наук, проф., Вычислительный центр им. А. А. Дородницына; П. О. Скобелев, д-р техн. наук, НАО «Группа компаний «Генезис знаний», СамГТУ; В. В. Солюмин, канд. воен. наук, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; А. П. Солнцев, д-р. воен. наук, проф., ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; Е. В. Судов, д-р техн. наук, проф., НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика»; А. В. Цырклов, д-р техн. наук, проф., ГКНПЦ им. М. В. Хруничева; В. А. Шахнов, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана; Е. И. Шульгин, д-р техн. наук, НИЦ при президиуме АИИ им. А. М. Прохорова

☎ редакции (495) 491-43-17
E-mail: izdanie@ntckompas.ru
http://ntckompas.ru

Информационные технологии
в проектировании и производстве:
Науч.-техн. журн./ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2021.
№ 4 (184). С. 1—56.

Редактор О. А. Константинова
Компьютерная верстка: Н. В. Ильина,
К. В. Трыкина

Подписано в печать 05.10.2021.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 6,5. Уч.-изд. л. 6,7.
Заказ 1981. Тираж 250 экз.
Адрес редакции: 125424, Москва,
Волоколамское ш., 77, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».
Отпечатано в ООО «Рапидограф».
117342, Москва, ул. Бултерова, д. 17Б.
Индекс 79378. 9 статей.

Статьи рецензируются.

© Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Инновационные технологии решения задач проектирования, моделирования и производства

- Огородникова О. М., Огородников А. И. Компьютерное моделирование технологии изготовления проволоки из платиновых сплавов с повышенными механическими свойствами..... 3
- Пирогова М. А., Лешихина И. Е., Краюшкин В. А. Обзор передовых платформ дополненной реальности для разработки индустриальных приложений уровня "рабочее место"..... 7
- Власов А. И., Невзоров И. В. Анализ архитектур и технологий хранилищ данных..... 13
- Лавренов К. Е., Шевелёва А. П., Романов О. Т., Машкин М. Н. Задача выбора оптимального маршрута беспилотного летательного аппарата при противодействующих, географических и погодных ограничениях в области полёта..... 22
- Николаев П. М., Шардин А. О., Левицкий А. В., Никуленко А. А., Юстус А. А., Ларютина М. А. Повышение эффективности обработки результатов измерений, полученных с оптических стереосистем 29

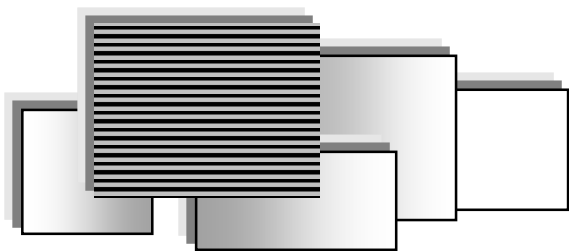
Прикладные задачи применения информационных технологий

- Митрушкин Е. И. Фрагмент метаметодологии исследования автоматизированных систем..... 34
- Сумароков С. В., Жабоев Т. К., Новосельский Ф. О., Саченко А. С. Разработка макета расчётного комплекса для решения задач оптимизации нагрузок на трубопроводные системы 38
- Кривоногов А. А., Пителинский К. В., Федоров Н. В. Перспективные платформы смарт-контрактов как новый виток развития глобального рынка цифровых технологий 46
- Митрушкин Е. И., Баландин С. Ю. Некоторые направления совершенствования и развития автоматизированных систем 53

INFORMATION TECHNOLOGY OF CAD/CAM/CAE

THE SCIENTIFIC JOURNAL

Information on recent advances in CAD/CAM/CAE, industry & business & complex information technology, including methods and tools of computer graphing, geometrical and mathematical modeling, database control methods on estimation and provision of control and reliability.



ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

УДК 004.94

DOI: 10.52190/2073-2597_2021_4_3

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ИЗ ПЛАТИНОВЫХ СПЛАВОВ С ПОВЫШЕННЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

О. М. Огородникова, д-р техн. наук; А. И. Огородников
Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия

Компьютерному моделированию методом конечных элементов подвергнут технологический процесс изготовления проволоки холодным способом из сплавов Pt—Ni, легированных медью, которые благодаря пластической деформации и упорядочивающему отжигу приобретают повышенные механические свойства. Задача о распределении напряжений в волоке и заготовке решена в осесимметричной постановке на двумерной расчетной сетке. Сформированная компьютерная модель позволяет варьировать геометрию инструмента, степень обжатия заготовки, скорость волочения при поиске оптимального сочетания производительности процесса и качества проволоки.

Ключевые слова: платина, проволока, волочение, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

Сплавы благородных металлов ввиду высокой стоимости и уникальности служебных свойств требуют компьютерного моделирования технологий изготовления изделий из них [1]. В частности, сплавы платины с никелем не подвержены окислению при нагреве, имеют предел прочности 490—640 МПа, соответствующий конструкционным материалам, и используются для изготовления скользящих и разрывных контактов [2]. Проволока из платина-никелевых сплавов активно исследуется как основа каталитических сеток [3].

Исследование новых сплавов и технологий выполняется методами компьютерного моделирования [4]. Программа DEFORM-2D является специализированным инструментом для компьютерного моделирования осесимметричных задач пластического деформирования, включая технологические процессы волочения проволоки [5]. Программный комплекс DEFORM использует метод конечных элементов для дискретного решения дифференциальных уравнений, описывающих перемещение точек расчетной сетки при силовом нагружении.

В литературных источниках представлено крайне мало информации по компьютерному моделированию и проектированию технологий изготовления проволоки из платиновых сплавов с повышенными механическими свойствами. В данной статье рассмотрены задачи построения релевантной компьютерной модели технологических процессов волочения, включающей напряженно-деформированные состояния заготовки и волоки.

Характеристики исследованных платиновых сплавов

В статье рассмотрены сплавы на основе Pt—Ni с гранецентрированной кубической решеткой, в которой часть атомов платины замещена атомами никеля. Такое замещение приводит к формированию упорядоченной структуры [6] и повышению прочности, если сплав продеформировать и выдержать при повышенных температурах, дав возможность процессам внутрирешеточной диффузии послойно перегруппировать атомы в соответствии с критерием минимальной

потенциальной энергии. Итоговый сплав обладает высокой коррозионной стойкостью благодаря благородному компоненту, в то время как дополнительное легирование медью варьирует электросопротивление по установленному линейному закону в широком интервале значений (от 0,2 до 0,7 мкОм·м) и обеспечивает заданную величину электросопротивления. Повышенные механические свойства, включая устойчивость против истирания, позволяют изготавливать из таких сплавов скользящие контакты для проволочных потенциометров, работающих в условиях сухого трения.

Технология изготовления проволоки из платиновых сплавов

В статье рассмотрен технологический процесс получения проволоки из платиновых сплавов способом холодного волочения, который представлен в модели движением цилиндрической заготовки через конический канал волоки. Волочение осуществляется при комнатной температуре в несколько этапов так, что на каждом этапе достигается снижение диаметра проволоки до неразрушающего уровня пластической деформации (степень деформации 75 %) и выполняется разупрочняющий отжиг при 800 °С. Диаметр литой заготовки составляет 10 мм, диаметр готовой проволоки может быть получен в пределах от 2 мм до 10 мкм. Тонкая и сверхтонкая проволока используется для изготовления тканых и вязаных катализаторных сеток [7].

Рабочим инструментом в процессах холодного волочения платиновой проволоки является волока, которая состоит из карбидной матрицы и запрессованной в нее твердой алмазной вставки [8].

Использованная программа для компьютерного моделирования технологии

Программный комплекс DEFORM выполняет методом конечных элементов моделирование большого спектра технологий обработки давлением, для которых вычисляется распределение напряжений, деформаций, температуры как в заготовке, так и в инструменте [9]. В статье рассмотрено моделирование технологических процессов волочения платиновых сплавов при комнатной температуре с использованием модуля DEFORM-2D. При моделировании таких процессов представляют интерес расчетные результаты, показывающие напряжения в заготовке и волоке, пластическую деформацию и деформационное упрочнение заготовки. На основании расчетных результатов оптимизируются технологические параметры (скорость процесса, угол конусности волоки) и выбираются дополнительные условия получения бездефект-

ной проволоки, например применение смазочных материалов.

Геометрическая модель

Геометрическая модель создается в конечно-элементном моделировании для генерации расчетной сетки в привязке к поверхностям геометрической модели. Дальнейшая настройка компьютерной модели выполняется на расчетной сетке. В случае волочения решается осесимметричная задача, для которой плоская геометрическая модель с выделенной осью симметрии является достаточной. Параметрическое задание геометрии позволяет изменять линейные размеры алмазной вставки при поиске оптимального напряженно-деформированного состояния в расчетах. На рис. 1 показана геометрическая модель, которая состоит из волоки и движущейся через нее цилиндрической заготовки в разрезе.

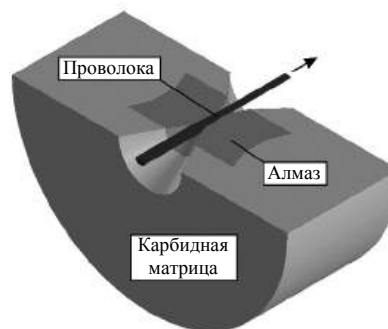


Рис. 1. Геометрическая модель волоки и движущейся заготовки в разрезе

Модели поведения материалов

Для твердых материалов волоки принята упругая модель поведения, которая полностью определяется двумя физико-механическими свойствами: модулем нормальной упругости E и коэффициентом поперечного сжатия μ . Необходимые данные имеются в базе данных материалов программы DEFORM.

Для материала заготовки принята упруго-пластическая модель поведения, которая составляется из двух уравнений. На упругом участке деформирования выполняется линейная зависимость истинных напряжений σ от упругих деформаций ε : $\sigma = E\varepsilon$. На пластическом участке деформирования выполняется степенная зависимость: $\sigma = \chi\varepsilon^\lambda$, где $0 < \lambda < 1$ — коэффициент линейного упрочнения. Коэффициенты степенной зависимости χ и λ определяются экспериментально по кривым деформационного упрочнения [10]. Материал заготовки считается изотропным, поскольку после высокотемпературной рекристаллизации имеет равноосную зеренную микроструктуру.

Конечно-элементная модель, граничные и начальные условия

Задача решена на плоской конечно-элементной сетке, представляющей сечение геометрической модели. Граничные и начальные условия заданы на двухмерной модели половины сечения с выделенной осью симметрии. При определении опций компьютерной модели заданы параметры изотермического деформирования, установившегося режима движения, осесимметричной задачи. Ограничение степеней свободы отражает неподвижность оправки и исключает движение цилиндрической поверхности матрицы, помещенной в оправку. Осевое движение заготовки определено скоростью волочения в пределах от 1 до 3 мм/с. Контактные условия на поверхности заготовки, граничащей с инструментом, запрещают пространственное совмещение фрагментов расчетной сетки в соответствии с методом штрафов. Сила трения пропорциональна интенсивности касательных напряжений с линейным коэффициентом, равным коэффициенту трения на поверхности алмаза с учетом смазки.

Результаты компьютерного моделирования

Процесс осесимметричного растяжения проволоки из платина-никелевых сплавов с частичной заменой атомов никеля атомами меди был изучен экспериментально на разрывных машинах Instron ТМ-М. В компьютерном моделировании процессов волочения был задан аналогичный уровень интенсивности нагружения с относительной степенью обжатия заготовки 10 %, что позволило использовать результаты обработки экспериментальных данных, а именно кривые деформационного упрочнения, для задания модели поведения сплава и выявления возможных критических участков околопредельных напряжений на конечно-элементной модели.

Компьютерное моделирование позволяет в вычислительных экспериментах определить оптимальные условия волочения, когда исключаются разрушение заготовки и внеконтактная деформация за волокой вследствие нулевого запаса прочности. В частности, снижение уровня напряжений достигается изменением геометрии проволоки. Авторами предложен менее жесткий внешний контур алмазной рабочей части проволоки (рис. 2, а), который снижает уровень напряжений на 20 % и в заготовке, и в инструменте. Подбором геометрических параметров достигается также компактная конфигурация концентратора напряжений в инструменте и очага пластической деформации в заготовке (рис. 2, б).

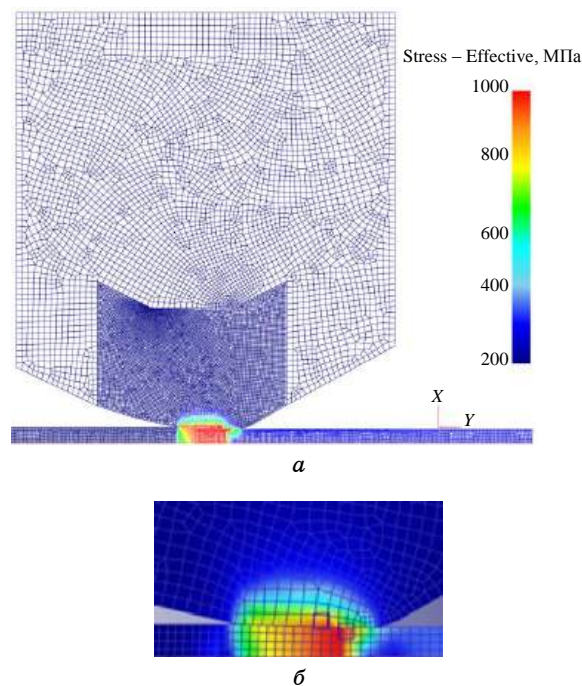


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений в сечении проволоки (а) и заготовки (б)

Заключение

Сформирована конечно-элементная модель установившегося процесса холодного волочения проволоки из платиновых сплавов через неподвижную волоку. Сформированная модель позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние заготовки и инструмента, варьировать и оптимизировать геометрические параметры инструмента.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования РФ
(Государственный контракт
№ 075-03-2020-582/4).

Литература

1. Огородникова О. М., Бородин Е. М. Компьютерный анализ напряженно-деформированного состояния инструмента для волочения платиновых сплавов // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2016. № 1. С. 15—18.
2. ГОСТ 13498-2010 Платина и сплавы на ее основе. Марки. — М.: Стандартинформ, 2012. — 12 с.
3. Shuyan L., Fang D., Zhicheng T., Qingchun W. The formation of wrapping type Pt-Ni alloy on three-dimensional carbon nanosheet for electrocatalytic oxidation of methanol // International J. Hydrogen Energy. 2021. V. 46. P. 15431—15441.

4. Огородникова О. М. О проблемах интеграции вычислительного материаловедения в цифровое машиностроение // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2014. № 2(154). С. 30—34.

5. Khanawapee U., Butdee S. A study of barreling and DEFORM 3D simulation in cold upsetting of bi-material // Materials Today: Proceedings. 2020. V. 26. P. 1262—1270.

6. Hu J., Xie M., Chen Y., Fang J., Yang Y. Thermodynamic assessment of Au—Pt—Ni system // Materials Today Communications. 2021. V. 26. AN 102061.

7. ГОСТ 3193-2015 Сетки катализаторные из сплавов на основе платины. — М.: Стандартинформ, 2016. — 14 с.

8. ГОСТ 6271-90 Волоки алмазные. Технические условия. — М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. — 14 с.

9. Огородникова О. М., Бородин Е. М., Гудин А. А. Компьютерное исследование инструмента для изготовления проволоки // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. № 6. С. 983—989.

10. Огородникова О. М., Литвинов В. С., Саханская И. Н. Упорядочение, рекристаллизация и механические свойства сплавов Pt—Ni—Cu // Физика металлов и материаловедение. 1989. Т. 67. № 5. С. 969—973.

SIMULATION OF THE TECHNOLOGY FOR THE MANUFACTURE OF WIRE FROM PLATINUM ALLOYS WITH ENHANCED MECHANICAL PROPERTIES

O. M. Ogorodnikova, A. I. Ogorodnikov

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia

The technological process of cold drawing of copper-alloyed Pt—Ni alloys is subjected to computer simulation by the finite element method. The considered alloys have enhanced mechanical properties due to plastic deformation and subsequent annealing to order the atomic structure. The problem of stress distribution in the tool and workpiece was solved in an axisymmetric formulation on a two-dimensional computational grid. Using the created computer model, it is possible to vary the geometry of the tool, the degree of reduction of the workpiece and the speed of drawing in search of the optimal combination of process productivity and wire quality.

Keywords: platinum, wire, drawing, computer simulation, finite element method.

Огородникова Ольга Михайловна, профессор.

E-mail: Olga.Ogorodnikova@urfu.ru

Огородников Алексей Игоревич, старший преподаватель.

E-mail: A.I.Ogorodnikov@urfu.ru

Статья поступила в редакцию 2 июля 2021 г.

УДК 338.364

DOI: 10.52190/2073-2597_2021_4_7

ОБЗОР ПЕРЕДОВЫХ ПЛАТФОРМ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ УРОВНЯ "РАБОЧЕЕ МЕСТО"

М. А. Пирогова, канд. техн. наук; И. Е. Лешихина, канд. техн. наук
ФГБОУ ВО НИУ «Московский энергетический институт», Москва, Россия

В. А. Краюшкин, канд. техн. наук
ООО «Продуктивные технологические системы», Москва, Россия

Рассмотрены возможности эффективного промышленного применения технологии дополненной реальности для решения задач непосредственно на рабочем месте.

Ключевые слова: дополненная реальность, визуальный контент, платформы дополненной реальности, носимые устройства дополненной реальности.

Одна из задач цифровой трансформации промышленного производства — это наиболее полное внедрение передовых информационных технологий на всех этапах жизненного цикла изделия (ЖЦИ) с охватом как производственных этапов с учетом запросов непосредственно на рабочем месте, так и этапов послепродажного сопровождения, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Речь идет о как можно более глубоком внедрении передовых информационных технологий во все производственные процессы, касающиеся разработки, производства, эксплуатации и сопровождения изделий. К такого рода передовым информационным технологиям относятся и технологии дополненной реальности. В данной статье рассматриваются возможности использования дополненной реальности для задач информационного сопровождения выполнения операций и рабочих заданий на производстве и в эксплуатационно-сервисной деятельности на примере наиболее популярных AR-платформ.

Для этих технологий — augmented reality, mixed reality, assisted reality (в русскоязычной нотации все они объединяются термином "дополненная реальность"), удачно освоивших область "интертаймента" (игровые приложения, реклама, иммерсивные презентации), все чаще рассматривается возможность эффективного промышленного применения.

Рост интереса к промышленному применению технологии дополненной реальности можно объяснить как наращиванием функционала практического применения в рамках наиболее популярных платформ и сред разработки приложений дополненной реальности, так и необходимостью развивать и шире использовать для реализации производственных процессов особенности технологии дополненной реальности. Если говорить о дискретном производстве сложных современных изделий и, шире, о процессах, составляющих полный жизненный цикл изделия, то самым естественным, а потому, и самым ранним освоенным методом применения

технологии дополненной реальности явилось использование AR-приложений на ранних этапах проекта, например на этапах маркетинговых разработок, исследований рыночных потребностей и визуализации концепта конечного изделия в реальной обстановке. Раннее применение AR-платформ именно на самом первом этапе ЖЦИ облегчалось еще и тем, что аналогичное применение технологии дополненной реальности к этому времени достаточно активно использовалось в неиндустриальных рекламной и иммерсивно-презентационной областях. С небольшими доработками и изменениями те же методы и ПО, которые применялись в рекламе, могли быть использованы и на начальных этапах ЖЦИ. Однако использование инновационных визуализационных возможностей дополненной реальности на дальнейших этапах ЖЦИ существенно ограничивается тем, что в случае промышленного применения использование этой информационной технологии не может быть рассмотрено вне общего ландшафта информационных технологий современного промышленного производства, вне интеграции в контур единой информационной структуры. Тем не менее интерес к развитию индустриального освоения технологии дополненной реальности не угас. Он не угас как в отношении продвижения AR-платформ для разработки приложений дополненной реальности для промышленного использования, так и в отношении разработок носимого визуализационного оборудования ("очки дополненной реальности") для использования в реальной рабочей обстановке. Относительно оживления в секторе специализированных (носимых) индивидуальных AR-устройств стоит отметить развитие линейки Microsoft HoloLens — выпуск HoloLens 2, реинкарнацию "старого" проекта Google Glass, революционный стартап Magic Leap. В том что касается развития AR-программного обеспечения для промышленности, то окончательно оформился переход от разработок на базе "чистого" низкоуровневого ПО AR (ARKit, ARCore) в поль-

зу применения платформ дополненной реальности [1]. Среди адептов широкого внедрения AR-технологии преобладало мнение, что в течение нескольких лет каждый будет использовать не только универсальные коммуникационные устройства (смартфоны, планшеты), но и специальные гарнитуры или средства AR-просмотра для самых разных приложений (информация в реальном времени, игры, посещение виртуальных музеев, "удаленное" участие в мероприятиях и т. д.) и на этой основе естественным образом можно будет перейти к применению этих же устройств для работы с промышленными приложениями дополненной реальности. Однако скорость внедрения AR-технологий была отдаленно несопоставима с коммуникационными и визуализационными возможностями аппаратного обеспечения и задачами промышленного использования с учетом техники безопасности, информационной безопасности и эргономики рабочих процессов. В результате к 2017—2018 гг. первоначальный энтузиазм в промышленности быстро угас, особенно учитывая ограниченный коммерческий успех предложенных решений. Тем не менее к 2019—2020 гг. (особенно в условиях ограничений COVID-2019) в промышленности произошло прогнозируемое специалистами [2] возрождение интереса к этим технологиям, когда потенциальные выгоды перевесили очевидные проблемы эстетики, технологии и стоимости.

Аппаратная составляющая для использования AR-приложений

Существует несколько устройств HW для промышленного использования. К ним прежде всего относятся Android и Apple планшеты уровня Pro (10"—12" экраны, ОЗУ от 4 ГБ, возможности связи по протоколам BLE, IEEE 802.13, сертификация по влаго- и пылезащищенности IP68, сертификация по механическим воздействиям IK05 и выше), а также носимые устройства, которые являются результатом развития аналогичных более ранних моделей таких AR-устройств. Практически пока единственными сертифицированными для использования в реальных условиях промышленного производства или в условиях напряженной эксплуатации изделий являются только очки-монокюляры дополненной реальности HMT-1 и HMT-1Z1. Для использования в условиях боевых действий компания Microsoft доработала свою конструкцию очков-шлема дополненной реальности MS HoloLens-2 в защищенном исполнении с планом поставки 120 000 таких устройств, но только для использования в армии США и без разрешения применения в гражданских областях (рис. 1). По состоянию на первую половину 2021 г. никаких других серийно предлагаемых на рынке носимых устройств AR, соответствующих

ющих промышленному защищенному исполнению, нет.



Рис. 1. Носимое наголовное устройство — очки дополненной реальности HoloLens в военном полевом исполнении — Integrated Visual Augmentation System (IVAS) (источник — Microsoft)

Итак, для промышленного применения с определенными оговорками из мобильных устройств дополненной реальности возможно использование смартфонов, планшетов, сертифицированных по IP68 и по IK05, а из носимых устройств — моделей MS HoloLens, MS HoloLens 2, VUZIX M400, Epson Moverio BT350 (BT 2200) и уже упомянутых полностью сертифицированных для промышленного применения очков-монокюляров дополненной реальности realwear HMT-1 и realwear HMT-1Z1 (рис. 2).



Рис. 2. Семейство очков дополненной реальности, наиболее подходящих для использования в промышленности

Платформы разработки промышленных AR-приложений

Рассмотрим состояние рынка платформ дополненной реальности, наиболее полно отвечающих на запросы промышленного применения приложений дополненной реальности. Как следует из материалов обзоров в сетевых изданиях, аналитических форумов и консалтинговых обзоров, касающихся AR-платформ промышленного применения, все больший интерес привлекают возможности разработки приложений дополненной реальности для использования их непосредственно на рабочем месте на предприятии, в цехе, в рабочей зоне. Иными словами, речь идет о непосредственном доведении технологии дополненной реальности до рабочего, техника, оператора ("connected worker", "под-

ключенного к сети передачи производственной информации рабочего)". Например, в соответствии с рейтингом PAC RADAR (октябрь 2020 г.) платформ AR, выполненным компанией TeKnowLogy Group (<https://www.teknowlogy.com/en/>) для оценки востребованности решений, полученных на этих платформах для непосредственного использования на рабочем месте, определилась тройка лидеров: компания PTC (торговая марка Vuforia), немецкая компания RE'FLECT и компания Ubimax (с 2021 г. — AR-подразделение TeamViewer для задач удаленной поддержки и обслуживания рабочих и техников), см. рис. 3.

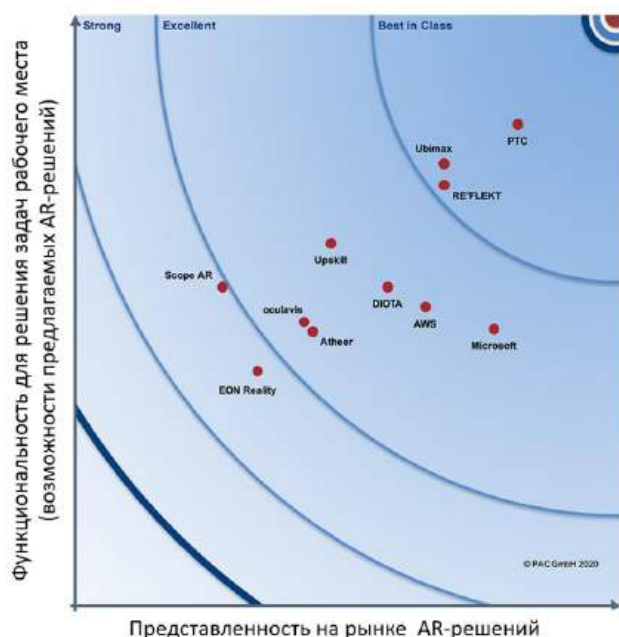


Рис. 3. Распределение в координатах "распространенность—функциональная мощность" платформ дополненной реальности для задач непосредственной поддержки на рабочем месте (по материалам европейского обзора, осень 2020, TeKnowLogy Group)

Лидер текущего рейтинга — компания PTC — предлагает для использования непосредственно на рабочем месте семейство Vuforia, состоящее из пяти сред разработки приложений дополненной реальности, предназначенных для различных промышленных применений и различных способов доступа к содержимому дополненной реальности (AR-контенту):

- Vuforia Engine — среда разработки сценариев дополненной реальности с наиболее широким среди всех AR-платформ разнообразием таргетирования (топологической привязки дополненной реальности к объектам или месту). 3D-контент — полигональные поверхностные модели без поддержки форматов промышленных САПР. Использование для любых Android-устройств (realwear HMT-1/1Z1 не поддерживаются), MS HoloLens. Результат разработки — AR-приложение — непосредственно загружается в устройство пользователя в формате приложения для этого устройства и функционирует в

дальнейшем как встроенное приложение этого устройства.

- Vuforia Studio — среда разработки сценариев дополненной реальности с широким использованием 3D-контента промышленных САПР — твердотельные параметрические модели и сборки. Разработка может вестись в трех вариантах: для Android и iOS мобильных устройств (смартфоны, планшеты), для MS HoloLens/HoloLens 2, а также для монокуляров дополненной реальности realwear HMT-1/1Z1. Разработанное приложение размещается (публикуется) в облачном хранилище Vuforia в специализированном Vuforia-формате. Для использования на оконечных устройствах необходимы загрузка на эти устройства бесплатного просмотрщика Vuforia View и наличие сетевого доступа (Интернет, TCP/IP-сеть предприятия) к облачному хранилищу Vuforia. Vuforia View доступен для Android- и iOS-устройств и MS HoloLens.

- Vuforia Expert Capture — распределенная среда разработки (фиксации) пошагового выполнения операций рабочего места в технологии дополненной реальности. Первичный контент разрабатываемого приложения — это зафиксированный в Vuforia Capture с помощью камер MS HoloLens или realware HMT-1 опыт профессионального квалифицированного рабочего по рациональному и эффективному выполнению последовательности действий на рабочем месте. Дополнительные 3D- и 2D-контенты, если они необходимы, могут быть добавлены к зафиксированным шагам в редакторе приложения — облачном Vuforia Editor. Полученный результат — AR-приложение — доступен так же, как и в случае с Vuforia Studio: конечный пользователь применяет Android- и iOS-устройства, MS HoloLens/HoloLens 2 или realwear HMT-1/1Z1 с загруженным в них Vuforia View, настроенным на доступ к результату, опубликованному в Vuforia Expert Capture.

- Vuforia Instruct — распределенная среда разработки пошагового выполнения сложных операций, включая операции визуальной проверки изделия ("инспекция"). Первичный контент аналогичен предыдущему случаю, но имеется важное расширение: за счет использования облачного САПР/PDM Onshape (<https://www.onshape.com/>) появляется возможность ввести 3D-модели промышленных САПР в состав первичного контента. Для доработки приложения также используется облачный редактор Vuforia Editor. Однако если прикладная задача включает проверку, инспекцию, выявление расхождений, то подключается аналитический модуль — портал Vuforia Insights для формирования аналитических отчетов. Получаемый результат — AR-приложение с 3D-контентом и аналитическими отчетами — доступен для просмотра конечным пользователем через просмотрщик Vuforia Vantage (загружаемый на мобильное Android или iOS-устройство, или в MS HoloLens) либо через Web-приложение

Vuforia Vantage Web (доступный playback через Vuforia Editor на Google Chrome или MS Edge).

- Vuforia Chalk — инструмент для установления и использования сессии видеосвязи с применением технологии дополненной реальности на мобильных устройствах и ПК. Установка возможна на устройствах с загруженным и установленным ПО — Vuforia Chalk, с выходом в Интернет. Для проведения сессии Vuforia Chalk оба абонента сессии должны быть зарегистрированы на облачном хостинге Vuforia Chalk — сервере, обеспечивающем по сети Интернет-поддержку сессии видеосвязи. Хостинг может быть предоставлен Заказчику компанией РТС на время подписки и в рамках оплаченной подписки или дополнительно приобретен Заказчиком для локального хостинга Vuforia Chalk.

Компания REFLECT предлагает применять непосредственно на рабочем месте семейство REFLECT, состоящее из двух сред для использования технологии дополненной реальности при оптимизации и информационного сопровождения при выполнении рабочими и техниками операций непосредственно на рабочем месте.

REFLECT ONE — среда разработки приложений дополненной реальности для пошаговых инструкций по работе со сложными устройствами, включая изготовление, сборочные и ремонтные операции.

Создание AR-контента ведется в REFLECT ONE Author — редакторе AR-сценариев. Получение пошагового анимированного 3D-контента (последовательностей сборок-разборок) на основе САПР-моделей выполняется в системе Cortona 3D и напрямую поставляется в среду редактирования REFLECT ONE Author.

Таргетирование для разрабатываемого AR-приложения выполняется в модуле REFLECT ONE Sync. Оно может быть выполнено и по метке, и по месту, и, что наиболее важно для промышленного использования, — по 3D-модели.

Разработанное и синхронизированное приложение размещается (публикуется) на облачном ресурсе, доступ к которому определяется на основе политики доступа предприятия, использующего технологию REFLECT ONE.

Просмотр опубликованного в REFLECT ONE приложения выполняется в свободно распространяемом приложении-вьюере REFLECT ONE viewer (доступен для бесплатного скачивания на Google Play Market, App Store и для Microsoft HoloLens), загружаемом на мобильные устройства пользователя.

REFLECT Remote — инструмент для установления и использования сессии видеосвязи с применением технологии дополненной реальности на мобильных устройствах и ПК. Установка возможна на устройствах, имеющих выход в Интернет, с загруженным и установленным ПО — REFLECT Remote. Для проведения сессии REFLECT Remote абоненты сессии должны находиться в зоне действия облачного хостинга REFLECT Admin Portal — сервера, обеспечивающего по сети поддержку REFLECT-сессии ви-

деосвязи. Для участия в сессии абонентам достаточно получить от REFLECT Admin Portal только Guest Access Code. Регистрация новых абонентов при присоединении к установленной сессии при этом необязательна. Поставка инструментального средства REFLECT Remote осуществляется как "White Labelled", т. е. допускает глубокую кастомизацию Заказчиком под свои стилевое оформление и корпоративное коммуникационное пространство.

Третий участник группы лидеров AR-сред для промышленного применения — компания **Ubimax** (теперь подразделение TeamViewer) — представлена на рынке AR-технологий для промышленного применения следующими двумя продуктами.

- TeamViewer Assist AR — AR-видеомессенджер, среда коммуникации между экспертом и находящимся на значительном удалении техником-рабочим, позволяющая средствами дополненной реальности сопровождать видеопоток 3D-трекингом проблемных зон обслуживаемого участка, маркированием и простым аннотированием обоими участниками обсуждаемых проблемных зон и сопровождением аннотациями этих зон при качественном трекинге. Сессия выполняется на удаленной стороне на мобильных Android- и iOS-устройствах, носимых наголовных устройствах дополненной реальности Epson Moverio, MS HoloLens, realwear HMT-1 и Vuzix. TeamViewer Assist AR представлен в двух исполнениях:

- Assist AR Lite — вариант видеомессенджера, использующий регистрацию пользователей TeamViewer для участия в сессии через стандартный SMS-протокол, применяющий OCR-распознавание текстовых меток, выполненных на основе стандартных фонов. Непосредственно ядро Assist AR Lite использует программные решения Google AR Core и Apple AR Kit. Мессенджер позволяет, кроме простых аннотаций, в случае необходимости дополнительно обеспечить передачу файлов между абонентами сессии;

- Assist AR Professional & Enterprise включает все возможности Assist AR Lite и, кроме того, предоставляет эксперту сессии возможность напрямую привлекать к участию в сессии новых пользователей по создаваемому им мгновенно персональному access-коду. Есть возможность протолировать сессии вплоть до видеозаписи для дальнейшего использования в аналогичных случаях. В профессиональной версии Assist AR с учетом многопользовательских сессий есть возможность устанавливать во время сессии закрытые групповые чаты. Возможно использование уже имеющейся на предприятии-заказчике корпоративной системы пользовательских аккаунтов — Single Sign-On.

- TeamViewer Frontline — среда разработки и применения пошаговых инструкций рабочего места. Решение состоит из нескольких специализированных модулей, доступных на мобильных устройствах, освобождающих руки рабочих

(носимые устройства дополненной реальности Vuzix, Epson и HMT-1):

- xPick — среда разработки и доставки AR-приложений для обеспечения сопровождения в основном логистических операций. Содержит систему распознавания баркодов и RFID-меток (используется индивидуальный браслет-сканер Ubimax);

- xMake — среда разработки и доставки AR-приложений, специализированная для выполнения пошаговых сборочных операций;

- xInspect — среда разработки и доставки AR-приложений, специализированная для выполнения проверочных операций и операций контроля сборки;

- xAssist — среда разработки и доставки AR-приложений, которые обеспечивают коммуникацию между экспертами по критическим ситуациям и удаленными “полевыми” техниками-рабочими. Сессия, поддерживаемая xAssist, предоставляет видео- и текстовый контент от эксперта технику в виде пошаговых иллюстрированных инструкций.

Технически все специализированные модули TeamViewer Frontline выполнены на основе трехзвенной структуры самой платформы TeamViewer Frontline:

- Frontline Creator — редактор AR-приложений, использующий графический интерфейс и меню виджетов. Разработанное в редакторе AR-приложение рассчитано на широкий круг мобильных устройств, включая носимые устройства дополненной реальности. Разработанное в редакторе AR-приложение, описывающее средствами дополненной реальности выполнение производственных операций, публикуется для дальнейшей его загрузки на носимые устройства пользователей. С помощью набора предварительно настроенных компонентов редактора Frontline Creator пользователи могут получить доступ к более продвинутым функциям рабочего процесса, включая преобразование речи в текст, интеграцию датчиков IoT (Интернета вещей), звонки в Skype для бизнеса, средство просмотра документов для файлов PDF;

- Frontline Command Center — веб-инструмент для контроля и оптимизации управления персоналом, занятым исполнением производственных заданий, учета и распределения мобильных оконечных устройств, задействованных в предоставлении Frontline-контента. Результат настроенной работы Frontline Command Center — аналитика эффективности выполнения производственных операций. Взаимодействие с персоналом, администрируемым через Frontline Command Center, ведется через носимые устройства дополненной реальности, в том числе Vuzix, Epson и HMT-1;

- Frontline Workplace — стандартное программное обеспечение, работающее на носимых устройствах дополненной реальности, в том числе на Vuzix, Epson и HMT-1 (при необходимости можно использовать смешанную инфра-

структуру). Frontline Workplace предоставляет информационную поддержку выполнения производственных операций для рабочих и техников непосредственно на рабочем месте. Вся информационная поддержка Frontline Workplace использует технологию AR. Контент, как правило, состоит из 2D-объектов, видеофрагментов, текста и визуализации PRD-документов.

Функциональный состав и структура AR-платформ-лидеров рынка средств разработки приложений дополненной реальности для промышленности, рассмотренных ранее, позволил многим крупным компаниям (решения от PTC: Caterpillar, Airbus, Infinity, Rockwell Automation; решения от RE'FLECT: Airbus Helicopters, Volvo, ABB, Bosch; решения от Ubimax: Mitsubishi Electric, Toyota Deutschland GmbH, Big Sun Energy) эффективно и быстро организовать AR-поддержку и информационное сопровождение производственной деятельности. Прежде всего это касалось AR-рабочих пошаговых инструкций: Vuforia Studio, REFLECT ONE, Frontline Creator. Как развитие применения этих разработок — AR-обеспечение профессиональных тренингов выполнения операций: Vuforia Studio, REFLECT ONE, Frontline Creator. Для эффективного сопровождения “полевой” работы удаленными экспертами компании удачно применяли разнообразные AR-мессенджеры: Vuforia Chalk, REFLECT Remote, TeamViewer Frontline xAssist. В последние полтора-два года выявилась еще одна область применения технологии дополненной реальности — рационализация передачи профессионального опыта от квалифицированных рабочих (сохранение рабочих знаний). Непосредственная фиксация средствами AR-платформ умелых и точечных профессиональных действий, выполняемых квалифицированными работниками и организациями, из зафиксированных действий образцовых пошаговых операций в виде AR-приложений позволяет эффективно решать задачу передачи накопленного опыта. Такая информация, оформленная в виде AR-приложения, становится реальным активом предприятия и может использоваться и как тренинговые материалы, и как средство повышения квалификации нового сотрудника, занимающего место уходящего на пенсию высококвалифицированного рабочего. Для этих задач в 2021 г. на рынок выходят системы Vuforia Expert Capture и Vuforia Instruct, максимально ориентированные на облачное применение и выступающие как SaaS-решения.

Отечественный рынок информационных систем давно и относительно успешно осваивает AR как технологию доставки контента потребителю. Однако большинство предлагаемых решений — это решения интертайментного направления. Большинство AR-разработок для индустриального применения, выполненных в России, — это готовые решения, разработанные софтверными компаниями по заказу промыш-

ленности [3], а не платформы разработки. Однако запросы отечественной промышленности на использование приложений дополненной реальности, в сущности, не сильно отличаются от передовых общемировых тенденций: "Промышленные AR-проекты в России сосредоточены в первую очередь на поддержке массового обучения в части выработки soft skills: тренажеры и симуляторы для обучения специалистов по оборудованию (операторов, ремонтников), пилотов, цифровые инструкции, а также дистанционной экспертизе." [4]. Относительно отечественных платформ разработчика AR-решений для промышленности, по мнению авторов, давно пристально отслеживающих состояние разработок AR, реально можно говорить о двух компаниях в Российской Федерации, которые предлагают свои услуги не столько как разработчиков, сколько как поставщиков именно сред разработки промышленных AR-решений [5]. Это компания inline group (<http://inlinegroup.ru>), предлагающая свою платформу Иксар. Как указано в пресс-релизе компании, Иксар — это программная платформа для устройств и технологий дополненной (вспомогательной) реальности, совместимая с наиболее популярными "умными" очками и другими мобильными устройствами класса AR (assisted, augmented reality). Она предназначена для проектирования и визуализации в режиме реального времени различных операций в промышленности, торговле, туризме, медицине, образовании и других сферах экономики. Вторая отечественная компания, предлагающая свою AR-платформу для промышленного применения, — Itorum MR (<http://itorum-mr.ru>). Предлагаемая компанией Itorum MR платформа AR-комплекс "Itorum MR" — это среда разработки AR-приложений для монокла дополненной реальности realwear HMT-1/1Z1. AR-комплекс "Itorum MR" позиционируется компанией-разработчиком как платформа совместной работы с техническим обо-

дованием для работы технических специалистов на производстве и удаленных экспертов через очки дополненной реальности.

Заключение

Функциональный состав и структура AR-платформ позволяют уже сейчас эффективно и быстро без сложного программирования разрабатывать AR пошаговые инструкции сложных рабочих процессов, предоставляя эти приложения дополненной реальности непосредственно исполнителю на рабочем месте за счет мобильных устройств и специализированных носимых устройств дополненной реальности. Наиболее полно функционал разработчика, дружественный пользовательский интерфейс и коммуникационные возможности представлены в составе платформ рыночных лидеров сектора AR, к которым относятся компании PTC, RE'FLECT и Ubimax (TeamViewer).

Литература

1. Краюшкин В. А., Лешихина И. Е., Пирогова М. А. Обзор применимости популярных платформ дополненной реальности для задач современного дискретного производства // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2021. № 1. С. 3—7.
2. Porter M. E., Heppelmann J. E. Why Every Organization Needs an Augmented Reality Strategy // Harvard Business Review 95. 2017. № 6. P. 46—57.
3. Промышленный VR/AR: кейсы и особенности рынка [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ict.moscow/news/vr-v-promyshlennosti/> (дата обращения: 06.05.2021).
4. Российский рынок дополненной и виртуальной реальности (AR/VR) оценили [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.itweek.ru/digitalization/news-company/detail.php?ID=216884> (дата обращения: 06.05.2021).
5. База знаний VR/AR [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ict.moscow/projects/vrar/> (дата обращения: 06.05.2021).

AN OVERVIEW OF ADVANCED AUGMENTED REALITY PLATFORMS FOR DEVELOPING INDUSTRIAL WORKPLACE APPLICATIONS

M. A. Pirogova, I. E. Leshikhina

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

V. A. Krayushkin

LLC PTS, Moscow, Russia

The article discusses the possibility of effective industrial application of augmented reality technology for solving problems directly at the workplace.

Keywords: augmented reality, AR-content, AR-development platforms, head mounted device — smart glass.

Пирогова Марина Аркадьевна, доцент.

E-mail: PirogovaMA@mpei.ru

Лешихина Ирина Евгеньевна, доцент.

E-mail: LeshikhinaIY@mpei.ru

Краюшкин Владимир Анатольевич, руководитель проектов.

E-mail: vkray@pts-russia.com

Статья поступила в редакцию 12 мая 2021 г.

АНАЛИЗ АРХИТЕКТУР И ТЕХНОЛОГИЙ ХРАНИЛИЩ ДАННЫХ (Обзор)

А. И. Власов, канд. техн. наук; И. В. Невзоров

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

Проведен анализ архитектур и структур хранилищ данных, в частности корпоративных. Основное внимание уделено главным компонентам и инструментам, благодаря которым функционирует хранилище данных. Поднята тема актуальности и необходимости использования хранилищ данных. Также подробно затрагивается прикладное применение хранилищ данных и их наиболее важных элементов. Рассмотрены основные принципы, на которых строится работа хранилищ данных. Проведен анализ принципов реализации и поднята история формирования основных терминов и принципов хранилищ данных. Приведены и проанализированы основные виды архитектур хранилищ данных, также рассмотрены их структуры и область применения. Проведен анализ основных компонентов, показаны основные инструменты функционирования хранилищ данных. Рассмотрены основные типы хранилищ данных. Показаны области применения технологии хранилищ данных в разных сферах бизнеса, а также уделено внимание основным преимуществам и недостаткам хранилищ данных. Рассмотрены принцип работы и область применения корпоративных хранилищ данных. Выделены различия между обычными хранилищами данных и корпоративными. Подняты проблемы взаимодействия с пользователями. Предложены некоторые изменения для элементов хранилищ данных, которые положительно повлияют на оптимизацию работы хранилищ данных. Проанализировано будущее хранилищ данных, а также дан прогноз их развития и возможных структурных изменений.

Ключевые слова: хранилище данных, корпоративное хранилище данных, Data Warehouse, ETL, ELT, OLAP.

Data WareHousing (DWH, Хранение данных) это процесс сбора данных из различных источников и управления ими для получения определенной, значимой производственной информации. Хранилище данных (ХД) является ядром системы производственной аналитики [1]. В условиях цифровой трансформации промышленности вопросы хранения данных приобретают первостепенное значение. При этом ключевую роль для корпоративных информационных систем (КИС) имеет умение анализировать и структурировать существующие потоки информации и в дальнейшем её использовать [2]. Экспонсивный рост объема информации приводит к появлению "Больших данных" как отдельного класса обрабатываемой информации, требующего использования сетевых вычислительных мощностей при обработке, поскольку одному человеку уже не под силу работа с такими объемами данных [3].

Для этого и нужны хранилища данных. Они выполняют роль центрального хранилища, куда информация поступает из одного или нескольких источников данных. Данные поступают в хранилище из баз данных (БД) и при этом могут быть по-разному структурированы. ХД объединяет информацию, поступающую из разных источников, в одну обширную структуру данных. Объединив всю эту информацию в единое целое, организация может более комплексно анализировать полученные данные. ХД позволяет проводить интеллектуальный анализ данных, который ищет в данных закономерности.

Это позволяет прогнозировать необходимые бизнес-показатели и более грамотно выстраивать работу организации [4].

Стратегическое использование данных достигается за счет сочетания технологий и компонентов. ХД — это электронное хранилище большого количества информации, предназначенное для запросов и анализа, но не для обработки транзакций [5]. Данная архитектурная конструкция информационной системы предоставляет пользователям текущую и историческую информацию для поддержки принятия решений. Стоит понимать, что хранилище данных является средой, а не продуктом [6].

Одной из основных проблем хранилищ данных является ухудшение работы в связи с увеличением объема информации.

Цель работы — анализ архитектуры хранилищ данных и корпоративных хранилищ данных (КХД) в частности, их основных компонентов и инструментов, необходимых для эффективного функционирования хранилищ.

Предложена концепция построения эффективного хранилища данных, сформулированы основные принципы построения ХД в условиях цифровой трансформации промышленности.

Анализ принципов реализации хранилищ данных

Хранилище данных часто путают с БД, которая по сути, является транзакционной системой. Транзакция — минимальная логически

осмысленная операция, которая имеет смысл и может быть совершена только полностью. БД контролирует и обновляет данные в режиме реального времени, предоставляя пользователям самую последнюю версию данных. ХД состоит из агрегированных структурированных данных, извлеченных в процессе ETL (*Extract, Transform, Load* — "извлечение, преобразование, загрузка"). В отличие от БД данные не происходят из ХД, а поступают из различных информационных и управленческих систем. Среда хранилища данных состоит из реляционной базы данных, решения ETL, механизма OLAP и инструмента анализа данных, а также других приложений, используемых для сбора данных и предоставления полезной информации бизнес-пользователям [6].

Потребность в хранении данных развивалась по мере того, как компьютерные системы становились все более сложными и нуждались в обработке растущих объемов информации. Концепция хранилищ данных — не новая идея. Большая часть работ была выполнена Полом Мерфи и Барри Девлином, когда они разрабатывали идею "хранилища бизнес-данных". Первоначальная цель хранилища данных состоит в том, чтобы предоставить архитектурную модель для решения потока данных в среды поддержки принятия решений. Далее приведены некоторые ключевые события в развитии ХД (рис. 1).

Проанализируем хронологию развития технологий ХД:

- 1960-е годы — General Mills и Дартмутский колледж в рамках совместного исследовательского проекта разрабатывают термины "Измерения и факты" [7];
- 1970-е годы — AC Nielsen и IRI предоставляют объемные витрины данных для розничных продаж [7];

- 1970-е годы — Билл Инмон начинает определять и образовывать термин "Хранилище данных" [7];

- 1975 — Sperry Univac представляет MAPPER (Ведение, подготовка и подготовка исполнительных отчетов) — систему управления базами данных и отчетности, которая использует первые в мире 4GL. Первая платформа, предназначенная для создания информационных центров (предшественник современных технологий хранения данных) [8];

- 1983 — Teradata представила компьютер базы данных DBC/1012, специально разработанный для поддержки принятия решений [9];

- 1984 — Компания Metaphor Computer Systems, основанная Дэвидом Лиддлом и Доном Массаро, выпустила аппаратно-программный пакет и графический интерфейс для бизнес-пользователей для создания системы управления базами данных и аналитики [10];

- 1988 — Барри Девлин и Пол Мерфи публикуют статью "Архитектура бизнес- и информационной системы", в которой вводят термин "хранилище бизнес-данных" [11];

- 1990 — Компания Red Brick Systems, основанная Ральфом Кимбаллом, представляет Red Brick Warehouse — систему управления базами данных, специально предназначенную для хранения данных [12];

- 1991 — Компания Prism Solutions, основанная Биллом Инмоном, представляет Prism Warehouse Manager — программное обеспечение для разработки хранилища данных [13];

- 1992 — Билл Инмон публикует книгу "Создание хранилища данных" [14];

- 1995 — основан Институт хранения данных, некоммерческая организация, которая продвигает хранение данных [15];

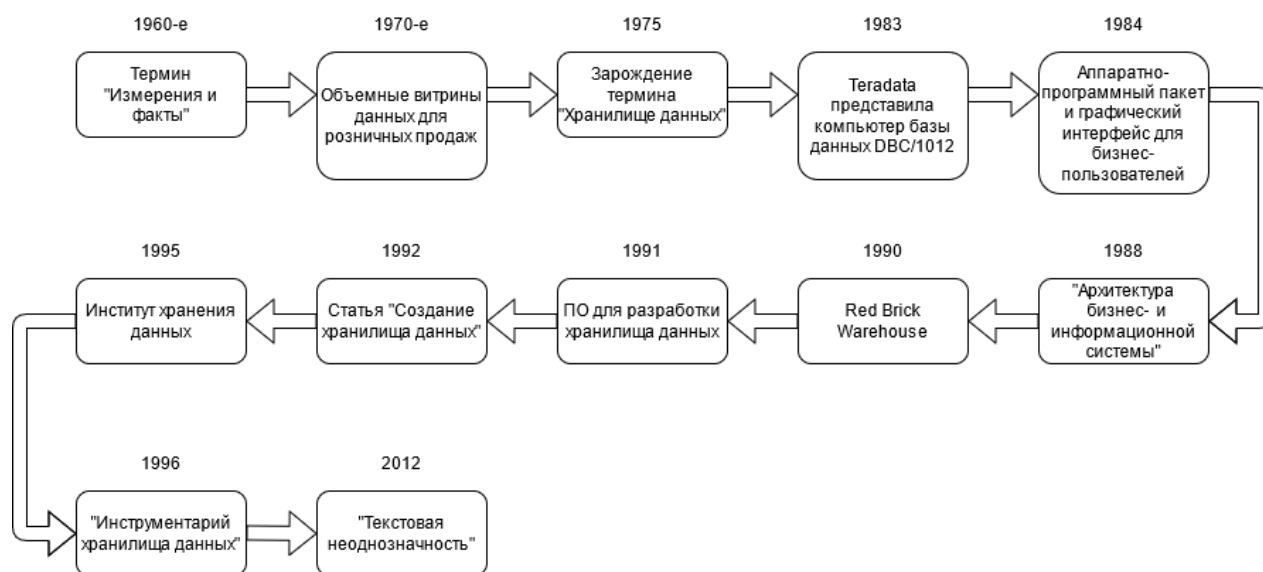


Рис. 1. Основные события в истории развития хранилищ данных

• 1996 — Ральф Кимбалл публикует книгу "Инструментарий хранилища данных" [16];

• 2012 — Билл Инмон разработал и обнародовал технологию, известную как "Текстовая неоднозначность". Текстовое устранение неоднозначности применяет контекст к необработанному тексту и преформатирует необработанный текст и контекст в стандартный формат базы данных. Как только необработанный текст проходит через текстовую неоднозначность, к нему можно легко и эффективно получить доступ и проанализировать с помощью стандартной технологии бизнес-аналитики. Текстовая неоднозначность достигается путем выполнения текстового ETL. Текстовая неоднозначность полезна везде, где есть необработанный текст, например в документах, Nadoop, электронной почте и т. д. Nadoop — это свободно распространяемый набор утилит, библиотек и фреймворк для разработки и выполнения распределённых программ, работающих на кластерах из сотен и тысяч узлов. Это основополагающая технология хранения и обработки больших данных [17].

Анализ архитектур хранилищ данных

Архитектура ХД определяет расположение данных в разных БД. Поскольку данные должны быть организованными, современная структура ХД сосредоточена на выявлении наиболее эффективных методов извлечения информации из необработанных данных в промежуточной области, а также на преобразовании ее в простую структуру потребляемого хранилища с использованием размерной модели, которая предоставляет ценные данные для бизнес-аналитики. При проектировании ХД следует учитывать три основных типа архитектуры ХД (рис. 2) [18].

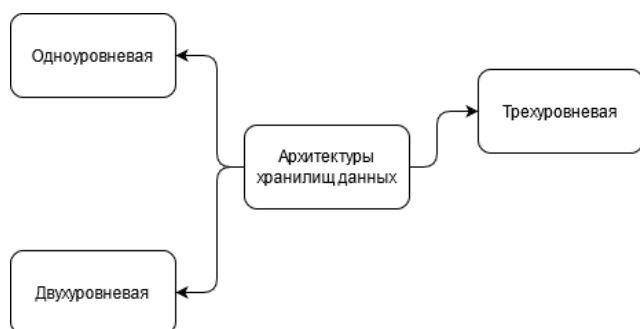


Рис. 2. Основные типы архитектуры ХД

Структура *одноуровневой архитектуры* (рис. 3) ХД сосредоточена на создании плотного набора данных и уменьшении объема депонируемых данных. Несмотря на то что это выгодно для устранения избыточности, такая архитектура не подходит для предприятий со сложными требованиями к данным и многочисленными их потоками. Для решения их проблем следует воспользоваться двухуровневой и трехуровневой

архитектурой хранилища данных, поскольку они имеют дело с более сложными потоками данных [19]. Одноуровневая структура используется на практике не часто.

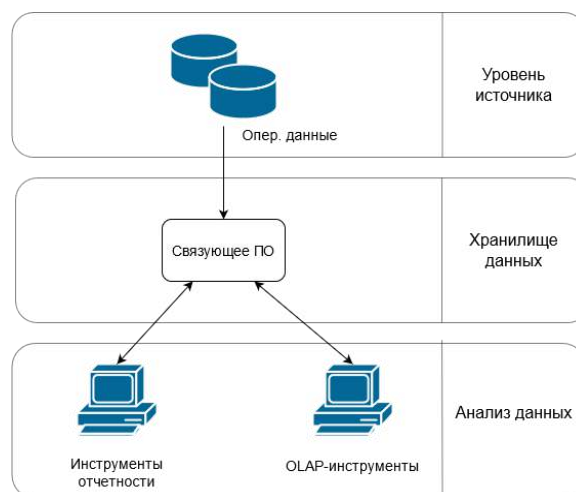


Рис. 3. Одноуровневая архитектура хранилища данных

Структура данных *двухуровневой архитектуры* ХД (рис. 4) отделяет материальные источники данных от самого хранилища.

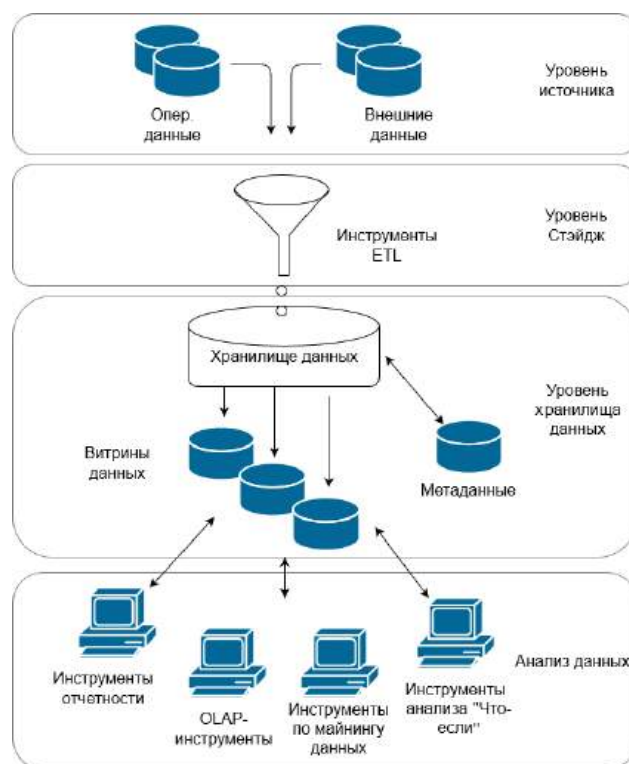


Рис. 4. Двухуровневая архитектура ХД

В отличие от одноуровневой, двухуровневая структура использует систему и сервер базы данных. Это чаще всего применяют в небольших организациях, где сервер используется как витрина данных [18]. Двухслойная архитектура разделяет физически доступные источники и хранилище данных. Эта архитектура не расши-

ряема и тоже не поддерживает большое количество конечных пользователей, а также имеет проблемы с подключением из-за сетевых ограничений.

Трехуровневая архитектура хранилища данных — это наиболее широко используемый тип современной архитектуры DWH, поскольку она обеспечивает хорошо организованный поток данных от необработанной до "ценной" информации.

Трехуровневая архитектура ХД — это модель архитектуры программного обеспечения клиент—сервер, в которой пользовательский интерфейс (представление), логика функциональных процессов ("бизнес-правила"), хранение компьютерных данных и доступ к данным разрабатываются и поддерживаются в виде независимых модулей, чаще всего на отдельных платформах. Она была разработана Джоном Дж. Донованом в Open Environment Corporation (ОЕС) [19] — инструментальной компании, которую он основал в Кембридже (штат Массачусетс).

Помимо обычных преимуществ модульного программного обеспечения с четко определенными интерфейсами, трехуровневая архитектура предназначена для того, чтобы любой из трех уровней мог быть обновлен или заменен независимо в ответ на изменения требований или технологий. Например, изменение операционной системы на уровне представления повлияет только на код пользовательского интерфейса.

Как правило, пользовательский интерфейс работает на настольном ПК или рабочей станции и использует стандартный графический пользовательский интерфейс, функциональную логику процесса, которая может состоять из одного или нескольких отдельных модулей, работающих на рабочей станции или сервере приложений, и СУБД на сервере баз данных или мейнфрейме, содержащем логику хранения компьютерных данных. Средний уровень может быть многоуровневым (в этом случае общая архитектура называется *n*-уровневой архитектурой) [19].

Нижний уровень — это, по сути, база данных серверов DWH. Обычно это система реляционных баз данных. Данные очищаются, преобразуются и загружаются в этот слой с помощью внутренних инструментов.

Средний уровень включает сервер оперативной аналитической обработки (OLAP). OLAP (*Online Analytical Processing* — интерактивная аналитическая обработка) — технология обработки данных, заключающаяся в подготовке суммарной (агрегированной) информации на основе больших массивов данных, структурированных по многомерному принципу. С точки зрения пользователя, этот уровень приложения представляет собой абстрактное представление базы данных и здесь данные преобразуются в порядок, более подходящий для анализа. Поскольку он включает в себя предварительно встроенный в архитектуру сервер OLAP, можно

также назвать его ХД, ориентированным на OLAP. Этот уровень также действует как посредник между конечным пользователем и базой данных.

Верхний уровень — уровень клиентского интерфейса. Это инструменты и API (*Application Programming Interface* — программный интерфейс приложения, интерфейс прикладного программирования), за счет которых пользователь подключает и извлекает данные из хранилища данных. Это могут быть инструменты запросов, инструменты отчетности, инструменты управляемого запроса, инструменты анализа и инструменты интеллектуального анализа данных [20].

Пример структуры трехуровневой архитектуры показан на рис. 5.

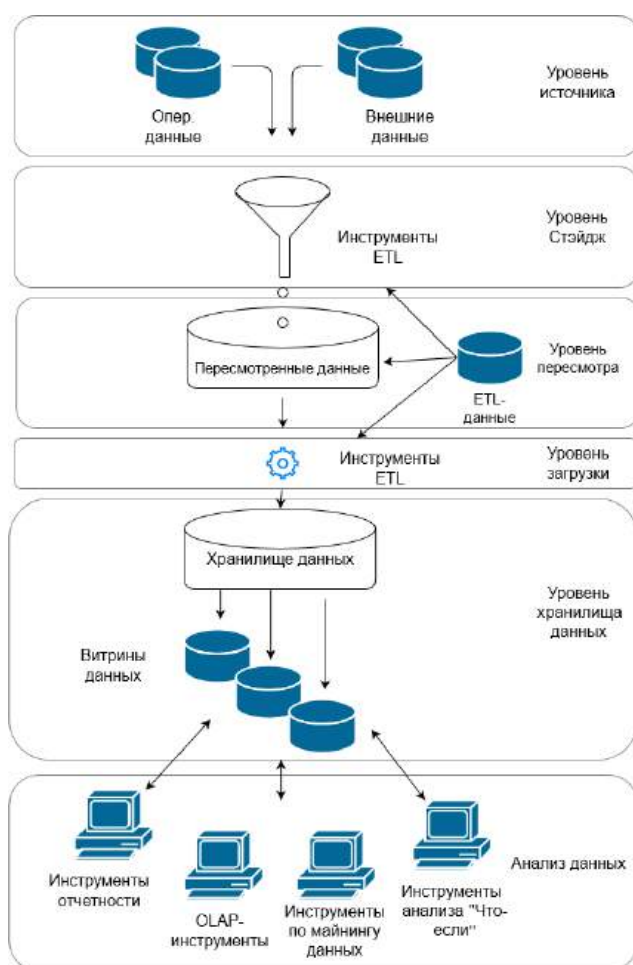


Рис. 5. Трехуровневая архитектура хранилища данных

Инструменты доступа конечных пользователей включают пять различных групп [21]:

- отчетности по данным;
- запросов;
- разработки приложений;
- EIS (*Executive Information System* — информационная система, предназначенная для поиска и анализа информации, а также для облегчения принятия решений руководителями компаний различного уровня);

• OLAP и инструменты интеллектуального анализа данных.

Более подробно и углублённо рассмотрим 6 основных компонентов ХД (рис. 6).



Рис. 6. Основные компоненты хранилища данных

Центральным компонентом архитектуры ХД является *банк данных*, в котором хранятся все корпоративные данные и который позволяет управлять ими для составления отчетов. Это означает, что нужно выбрать, какая база данных будет использоваться для хранения данных [20]. Далее приведены четыре типа баз данных, которые можно использовать:

- классические реляционные базы данных — это базы данных, ориентированные на строки, которые пользователь, возможно, использует каждый день (например, Microsoft SQL Server, SAP, Oracle и IBM DB2);
- аналитические базы данных, специально разработанные для хранения данных для поддержки аналитики и управления ею (например, Teradata и Greenplum);
- приложения хранилища данных — это не совсем разновидность базы данных для хранения (например, SAP Hana, Oracle Exadata и IBM Netezza);
- облачные базы данных могут размещаться и извлекаться в облаке, поэтому не нужно приобретать какое-либо оборудование для настройки хранилища данных (например, Amazon Redshift, Microsoft Azure SQL и Google BigQuery).

Инструменты ETL (Extract-Transform-Load) являются центральными компонентами архитектуры ХД. Эти инструменты помогают извлекать данные из разных источников, преобразовывать их в подходящую структуру и загружать в ХД. Выбранный инструмент ETL определит [22]:

- время, затраченное на извлечение данных;
- подходы к извлечению данных;
- вид применяемых преобразований и простоту их выполнения;
- бизнес-правила для проверки и очистки данных для улучшения аналитики конечного продукта;
- заполнение утерянных данных;
- схему распространения информации из фундаментального хранилища в приложения бизнес-аналитики.

Метаданные описывают хранилище данных и предлагают основу для данных. Это помогает в создании, сохранении, обработке и использовании хранилища данных. Метаданные можно разделить на два типа [20]:

- технические, содержащие информацию, которая может быть использована разработчиками и менеджерами при выполнении задач разработки и администрирования хранилища;
- содержащие информацию, которая предоставляет легко понятную точку зрения на данные, хранящиеся в хранилище.

Метаданные играют важную роль как для предприятий, так и для технических групп в понимании данных, имеющихся в хранилище, и преобразовании их в информацию.

Инструменты доступа к ХД используют базу данных или группу баз данных в качестве основы. Корпорации хранилищ данных обычно не могут работать с базами данных без использования инструментов. Они используют несколько инструментов для хранения данных без кода, таких, как [21]:

- запросов и отчетов, помогающие пользователям создавать корпоративные отчеты для анализа, которые могут быть в форме электронных таблиц, расчетов или интерактивных визуальных элементов;
- разработки приложений, которые помогают создавать индивидуализированные отчеты и представлять их в интерпретациях, предназначенных для конкретных целей отчетности;
- интеллектуального анализа данных для хранилищ данных, которые систематизируют процедуру выявления массивов и связей в огромных объемах данных с использованием передовых методов статистического моделирования;

- OLAP, которые помогают построить многомерное хранилище данных и позволяют анализировать корпоративные данные с различных точек зрения.

Шина хранилища данных определяет поток данных в архитектуре шины ХД и включает витрину данных. Витрина данных — это уровень доступа, используемый для передачи данных пользователям. Он используется для разделения данных, созданных для конкретной группы пользователей [21].

Уровень отчетности в хранилище данных позволяет конечным пользователям получить доступ к интерфейсу бизнес-аналитики или архитектуре БД бизнес-аналитики. Слой отчетности предназначен для работы в качестве панели мониторинга для визуализации данных, создания отчетов и извлечения любой необходимой информации [20].

Основные типы хранилищ данных (DWH) [11]:

- корпоративное (*Enterprise Data Warehouse* — EDW) — централизованное хранилище, предоставляющее услуги поддержки принятия реше-

ний в масштабах всего предприятия, предлагает единый подход к организации и представлению данных. Это также дает возможность классифицировать данные по предмету и предоставлять доступ в соответствии с этими разделами;

- хранилище оперативных данных (*Operational Datastore* — ODS) — это хранилище данных, необходимое, когда ни хранилище данных, ни системы OLTP не поддерживают потребности организации в отчетности. В ODS хранилище данных обновляется в режиме реального времени, что широко используется для рутинных действий, таких, как хранение записей о сотрудниках;

- витрина данных (*Data Mart*) — это часть хранилища данных, специально разработанная для определенного направления бизнеса, такого, как продажи, финансы. В независимой витрине данных можно собирать данные непосредственно из источников.

Корпоративные хранилища данных

КХД — это структурированное и централизованное пространство, где пользователи могут получить доступ к бизнес-данным. Бизнес-аналитика — это набор методов и программного обеспечения, используемых предприятием для агрегирования, обобщения, анализа и в конечном итоге извлечения ценности из бизнес-данных. Наличие данных из разрозненных источников и данных, хранящихся в отдельных платформах или бизнес-подразделениях, затрудняет интеграцию данных в рамках организации и обмен идеями на основе всех данных. В результате страдают анализ данных и бизнес-аналитика. КХД решает проблемы, связанные с разрозненными данными, помещая все соответствующие корпоративные данные в доступный центральный репозиторий для анализа в масштабах всего предприятия [23].

Разница между КХД и хранилищем данных семантическая. КХД — это хранилище данных, в котором хранятся все данные организации из источников по всему бизнесу. Хранилище данных меньшего размера может быть специфическим для бизнес-подразделения или направления бизнеса (например, витрина данных). Напротив, КХД призван быть единым хранилищем для всех данных организации и обычно строится на принципе "единой версии правды" или едином источнике правды, тем самым открывая доступ к широкому спектру данных для бизнес-пользователей компании [20].

В проектировании и теории информационных систем единый источник истины — это практика структурирования информационных моделей и связанных с ними схем данных таким образом, чтобы каждый элемент данных осваивался (или редактировался) только в одном месте. Любые возможные связи с этим элементом данных (возможно, в других областях

реляционной схемы или даже в удаленных федеративных базах данных) являются только ссылочными. Поскольку все остальные местоположения данных просто ссылаются на основное местоположение "источника истины", обновления элемента данных в основном местоположении распространяются на всю систему без возможности того, что где-то будет забыто повторяющееся значение.

Развертывание подобной архитектуры становится все более важным в корпоративных условиях, когда неправильно связанные дубликаты или ненормализованные элементы данных (прямое следствие преднамеренной или непреднамеренной денормализации любой явной модели данных) создают риск извлечения устаревшей и, следовательно, неверной информации. Распространенным примером может служить электронная медицинская карта, где крайне важно точно проверить личность пациента с помощью единого справочного хранилища, которое служит SSOT. Дублирующие представления данных в рамках предприятия будут реализованы с помощью указателей, а не дублирующих таблиц, строк или ячеек базы данных. Это гарантирует, что обновления данных для элементов в авторитетном расположении будут всесторонне распределены по всем объединенным базам данных в общей корпоративной архитектуре [24].

Наиболее полезная функция КХД заключается в централизации корпоративных данных, увеличении доступности этих данных для пользователей в различных бизнес-подразделениях и улучшении организации, структуры и автоматизации хранения и обработки данных.

КХД улучшает способность организации быстрее предоставлять информацию и дает предприятиям конкурентное преимущество.

Бизнес-подразделения в организации могут реплицировать данные из нескольких источников в репозиторий для анализа и бизнес-аналитики. Это устраняет узкие места в коммуникации и помогает пользователям быстрее получать доступ к необходимой информации.

Тщательное моделирование данных, необходимое для составления КХД, приводит к получению данных, которые лучше подходят для аналитики.

Важнейшим компонентом функционирующего КХД является процесс извлечения, преобразования и загрузки — ETL (*Extract-Transform-Load*). ETL объединяет данные из нескольких источников и преобразует их в согласованный формат для КХД. Старые локальные ХД выполняют преобразования в конвейере данных. Облачные КХД используют вариант этого процесса, ELT (извлечение, загрузка, преобразование), потому что облачные платформы обладают мощностью для выполнения необходимых преобразований данных после репликации [23].

На рис. 7 показаны сферы деятельности, в которых чаще всего задействовано ХД.

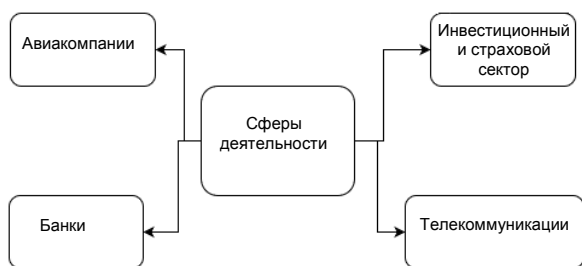


Рис. 7. Область применения хранилищ данных

Рассматривая вопрос об актуальности и необходимости в использовании хранилищ данных, нельзя не отметить, что они являются важным звеном бизнес-аналитики и дают такие возможности, как:

- обеспечение последовательности за счет структурированности и единого формата всех собранных данных, упрощение работы сотрудников, занимающихся принятием решений, анализом и обменом данными, стандартизация данных из разных источников снижает риск ошибки и повышает общую точность;
- принятие более грамотных бизнес-решений, повышение скорости и эффективности доступа к различным наборам данных и упрощение работы людей, анализирующих информацию и принимающих решения;
- доступ к историческим данным организации и их оценка позволяют анализировать и прогнозировать определённые бизнес-показатели, что помогает улучшению стратегий, тем

самым ведет к увеличению прибыли, а также снижению затрат [24].

Хранилища данных постоянно работают с большими массивами информации и очень быстро разрастаются. Самое важное в работе хранилищ — это то, чтобы данные вовремя попадали к пользователям, поскольку необходимо, чтобы производилось взаимодействие агентов в единой системе [25]. Таким образом, требуется обеспечить быстрое взаимодействие между слоями. Для этого рассмотрим некоторые предложения по улучшению и оптимизации работы ХД:

- использование секционирования для улучшения обновления ХД;
- сокращение объема данных там, где это возможно;
- удаление неиспользуемых индексов;
- оптимизация операций DML во время обновления. Реализация эффективной операции слияния;
- улучшение качества данных;
- обновление материализованных представлений;
- использование материализованных представлений с секционированными таблицами, быстрое обновление с отслеживанием изменения раздела.

Таким образом, все предложения по улучшению ХД направлены на оптимизацию ETL-механизмов и устранение незадействованных в работе ресурсов, которые занимают память.

Преимущества и недостатки использования хранилищ данных представлены в таблице.

Преимущества и недостатки использования хранилищ данных

Преимущества ХД	Недостатки ХД
Позволяет бизнес-пользователям быстро получать доступ к важным данным из некоторых источников в одном месте	ХД не самый лучший инструмент для взаимодействия с неструктурированными данными
Предоставляет согласованную информацию о различных межфункциональных действиях. Оно также поддерживает специальные отчеты и запросы	На создание и внедрение затрачивается большое время. Может устареть относительно быстро.
Помогает интегрировать множество источников данных, чтобы снизить нагрузку на производственную систему	Сложно вносить изменения в типы и диапазоны данных, схему источника данных, индексы и запросы
Помогает сократить общее время обработки анализа и отчетности	На деле является слишком сложным для обычных пользователей
Реструктуризация и интеграция упрощают пользователям использование отчетов и анализа	Сложность в управлении проектами при постоянном росте их объема
Позволяет пользователям получать доступ к критически важным данным из множества источников в одном месте. Это экономит время пользователя на получение данных из нескольких источников	Пользователи будут разрабатывать другие бизнес-правила, в связи с чем возникнет необходимость изменения структуры
Хранит большой объем исторических данных. Это помогает пользователям анализировать различные периоды времени и тенденции, чтобы делать прогнозы на будущее	Крупные затраты на обучение и внедрение

Хранилища могут просуществовать в течение довольно длительного периода в связи с тем, что в их создание было вложено много средств и от них зависят многие люди и бизнес-функции. Вместе с тем устойчивость требует переосмысления ХД. Архитектура хранилища данных больше не может быть автономной, так что необходимо продумать цель, размещение и позиционирование ХД в более широкой архитектуре управления данными. Все больше организаций задумывается о введении блокчейн-технологий [26, 27] в хранилища для анонимности информации, что особенно актуально для банков в связи с банковской тайной. Реализация требований цифровизации промышленности, реализации концепций "Индустрии 4.0", "Бережливого производства", "Умных фабрик", "Цифровых двойников" и машинного обучения ставит новые задачи для систем хранения и обработки данных [28–31]. Главная цель с киберфизических систем — максимальная автоматизация, частичное или полное исключение человека из производственных и бизнес-процессов, а для этого необходимы технологии анализа больших объемов данных.

Заключение

Работа с большими данными требует модернизации большинства сфер, связанных с информационными технологиями. ХД не стали исключением, и требуется переход с традиционной системы на более актуальную, что, по сути, сейчас и происходит или уже произошло в широком ряде организаций. Объем данных увеличивается с каждым годом, а иногда и месяцем. Именно поэтому ХД будут актуальны еще долгое время, ведь это перспективное решение для структурированных бизнес-данных.

Отдельные результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 0705-2020-0041

"Фундаментальные исследования методов цифровой трансформации компонентной базы микро- и наносистем".

Литература

1. Dedić N., Stanier C. An Evaluation of the Challenges of Multilingualism in Data Warehouse Development : Proceedings of the 18th International Conference on Enterprise Information Systems, 25–28 April 2016. Rome, Italy. Vol. 1. C. 196–206.
2. Власов А. И., Михненко А. Е. Принципы построения и развертывания информационной системы предприятия электронной отрасли // Производство электроники. 2006. № 4. С. 5–12.
3. Прудис А. А., Карпунин А. А., Власов А. И., Фатхутдинов Т. М., Узенков Д. А. Анализ технологических трендов развития корпоративных информационных систем в условиях цифровизации производства // Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии. 2019. С. 490–501.
4. Rainer R. Kelly, Cegielski Casey G. Introduction to Information Systems: Enabling and Transforming Business, 4th Edition. Wiley. 2012. P. 127, 128, 130, 131, 133.
5. Patil Preeti S., Rao Srikantha, Patil Suryakant B. "Optimization of data warehousing system: Simplification in reporting and analysis". IJCA Proceedings on International Conference and workshop on Emerging Trends in Technology (ICWET), 2011. № 9(6), P. 33–37.
6. Ponniah Paulraj Data Warehousing: a Comprehensive Guide for IT Professional. 2nd ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2010.
7. Kimball R., Ross M. The data warehouse toolkit: the complete guide to dimensional modeling / 2nd ed. Wiley Computer Publishing. Includes index. 2002. — 422 p.
8. Stern Nancy B. From Eniac to UNIVAC: An Appraisal of the Eckert-Mauchly Computers. 1981. 286 p.
9. Paul Gillin Will Teradata revive a market? Computer World. 1984. P. 43, 48. Retrieved 2017-03-13.
10. A Brief History of Decision Support Systems. Retrieved November 2, 2006.
11. Devlin B. A., Murphy P. T. An architecture for a business and information system. IBM Systems Journal. 1988. № 27. P. 60–80.
12. IBM Red Brick Warehouse. Archived from the original on 2015-12-11. Retrieved 2017-03-04.
13. Kerr James M. The IRM Imperative: Strategies for Managing Information Resources. Wiley, 1991. — 282 p.
14. Inmon B. Building the Data Warehouse. Wiley. ISBN 0-471-56960-7. 1992.
15. Barquin Ramon C., Edelstein Herbert C. Building, Using, and Managing the Data Warehouse. 1997. — 352 p.
16. Kimball Ralph The Data Warehouse Toolkit. Wiley. 2011. — 237 p.
17. Nandimath J., Banerjee E., Patil A., Kakade P., Vaidya S. Big data analysis using Apache Hadoop. 2013 IEEE 14th International Conference on. P. 700–703.
18. Data Warehouse: From Architecture to Implementation 1st Edition by Barry Devlin (Author), 1996.
19. Eckerson Wayne W. Three Tier Client/Server Architecture: Achieving Scalability, Performance, and Efficiency in Client Server Applications. Open Information Systems 10, 1 (January 1995): № 3(20).
20. Inmon William H., Derek Strauss, Genia Neushloss DW 2.0: The Architecture for the Next Generation of Data Warehousing. Elsevier, 2010. — 400 p.
21. Paulraj Ponniah Data Warehousing Fundamentals: A Comprehensive Guide for IT Professionals. John Wiley & Sons. 2001.
22. Singh J. Understanding ETL and Data Warehousing: Issues, Challenges and Importance: Role of ETL routines in Quality Data Warehouse Solutions. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2011. — 204 p.
23. Simon A. Enterprise Business Intelligence and Data Warehousing: Program Management Essentials. Elsevier Science. 2014. P. 166.
24. IBM Smarter Planet — Operational risk management for financial services. Archived from the original on September 2015.
25. Власов А. И., Цыганов И. Г. Архитектура корпоративной многоагентной автоматизированной системы фильтрации информационных потоков // Информационные технологии. 2005. № 1. С. 34–41.

26. Карпунин А. А., Козлов А. А. Анализ методов реализации децентрализованных приложений в конструкторско-технологической информатике // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 4(168). С. 39—44.

27. Карпунин А. А., Власов А. И., Новиков И. П. Системный анализ технологии обмена и хранения данных Blockchain // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 3(55). С. 75—83.

28. Власов А. И., Ганев Ю. М., Карпунин А. А. Системный анализ "Бережливого производства" инструментами визуального моделирования // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. № 4(160). С. 19—24.

29. Ганев Ю. М., Карпунин А. А., Власов А. И. Картирование потока создания ценностей в концепции "Бережливого производства" // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 2(162). С. 23—27.

30. Власов А. И., Ганев Ю. М., Карпунин А. А. Система 5S-технология создания эффективного рабочего места в концепции "Бережливого производства" // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 1(161). С. 65—68.

31. Шахнов В. А., Курносенко А. Е. Цифровая трансформация при подготовке производства изделий электроники // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 2. С. 51—56.

ANALYSIS OF ARCHITECTURES AND TECHNOLOGIES OF DATA (Review)

A. I. Vlasov, I. V. Nevzorov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The work is devoted to the analysis of architecture and structure of data warehouses, in particular corporate. The focus is on the main components and tools that make the data warehouse working. The topic of relevance and the need to use data warehouses was raised. The practice use of data warehouses and their most important elements are also discussed in detail. The basic principles on which the work of data warehouses is built are considered. The analysis of the implementation principles is carried out and the history of the formation of the basic terms and principles of data warehouses is raised. The main types of data warehouse architectures are presented and analyzed, their structures and scope are also considered. The analysis of the main components is carried out, the main tools for the functioning of data warehouses are shown. The main types of data warehouses are considered. The paper shows the areas of application of data warehousing technology in different areas of business, and also focuses on the main advantages and disadvantages of data warehouses. The principle of operation and the scope of application of corporate data warehouses are considered. The differences between conventional data warehouses and corporate ones are also highlighted. Problems of user interaction were raised. Some changes have been proposed for the elements of data warehouses, which will positively affect the optimization of the work of data warehouses. In conclusion, the future of data warehouses is analyzed, as well as a forecast of their development and possible structural changes.

Keywords: data warehouse, corporate data warehouse, Data Warehouse, ETL, ELT, OLAP.

Власов Андрей Игоревич, доцент.

E-mail: vlasovai@bmstu.ru

Невзоров Иван Владимирович, бакалавр.

E-mail: i.nevzorov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23 мая 2021 г.

УДК 27.083.7

DOI: 10.52190/2073-2597_2021_4_22

ЗАДАЧА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ПРОТИВОДЕЙСТВУЮЩИХ, ГЕОГРАФИЧЕСКИХ И ПОГОДНЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ В ОБЛАСТИ ПОЛЁТА

К. Е. Лавренов; А. П. Шевелёва; О. Т. Романов, канд. техн. наук;
М. Н. Машкин, канд. техн. наук

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

Рассмотрена задача нахождения оптимального маршрута беспилотного летательного аппарата от заданной начальной точки взлёта до заданной конечной точки полёта при противодействующих, географических и погодных ограничениях. Предложены алгоритм и программное обеспечение решения задачи с использованием метода муравьиных колоний.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, оптимизация, муравьиные колонии, ветер, рельеф, противодействующие объекты.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) являются видом авиационной техники, к которому приковано внимание большого числа специалистов. Это обусловлено очень динамичным развитием БПЛА и активным использованием его при решении целого спектра разноплановых задач. К таким задачам можно отнести применение БПЛА в гражданских целях [1], таких, как транспортировка грузов и медикаментов, в военных целях [2—4], при выполнении поисково-спасательных операций [5] и т. д.

Одним из важнейших этапов подготовки к полёту БПЛА, который непосредственно влияет на эффективность полёта и приводит к надёжности выполнения задания, снижая риски, является определение маршрута полёта.

Эффективность функционирования БПЛА напрямую зависит от погодных условий, подстилающей поверхности и противодействующих объектов, расположенных на ней. Вследствие этого возникает задача определения маршрута полёта БПЛА над определёнными зонами (точками) или, наоборот, уклонения от каких-либо нежелательных объектов на поверхности.

Подходы и алгоритмы решения задачи определения маршрута полёта БПЛА рассмотрены в [6—8].

Как правило, эта задача с математической точки зрения рассматривается как задача коммивояжёра в предположении, что разрабатываемый маршрут БПЛА является замкнутым и охватывает все точки расположения рассматриваемых объектов на плоскости карты.

В практическом использовании БПЛА часто приходится решать задачу определения маршрута полёта при условии, что для БПЛА заданы только точка взлёта и точка назначения. К таким задачам можно отнести, например, задачу транспортировки груза или лекарства в область района, где нет специальных устройств запуска БПЛА, т. е. имеет место случай одноразового использования аппарата. Для поиска требуемого маршрута алгоритмы и метод решения задачи коммивояжёра, очевидно, не применимы.

В работе рассматриваются метод и алгоритм решения задачи определения оптимального маршрута БПЛА от заданной начальной точки взлёта до заданной конечной точки полёта при противодействующих, географических и погодных ограничениях. Предложены алгоритм и программное обеспечение на основе метода муравьиных колоний.

Постановка задачи

Общую постановку рассматриваемой задачи можно сформулировать следующим образом. На карте местности в некотором заданном пространстве существуют как препятствия, так и свободные для полёта зоны. К препятствиям можно отнести горный рельеф — географические ограничения, противодействующие объекты (например, устройства, которые могут вести обстрел по воздушным объектам и радиоэлектронное подавление) и области с неблагоприятными для полёта погодными условиями — погодные ограничения. Необходимо проложить такой оптимальный маршрут полёта БПЛА на возможных для него небольших высотах в свободных зонах, чтобы при движении из начальной точки в конечную каждой области оптимального пути он как можно меньше подвергался воздействию противодействующих объектов, зон с неблагоприятными погодными условиями и не сталкивался с препятствиями в виде гор, т. е. маршрут должен быть наиболее безопасным.

Отдельный маршрут полёта БПЛА при этих условиях представляет ломаную линию, состоящую из отдельных отрезков, т. е. имеет следующий вид:

$$\{(\langle x_0, y_0 \rangle \rightarrow \langle x_1, y_1 \rangle), (\langle x_1, y_1 \rangle \rightarrow \langle x_2, y_2 \rangle), \dots, (\langle x_i, y_i \rangle \rightarrow \langle x_{i+1}, y_{i+1} \rangle), \dots, (\langle x_{n-1}, y_{n-1} \rangle \rightarrow \langle x_n, y_n \rangle)\}, \quad (1)$$

$\langle x_0, y_0 \rangle$ — координаты начальной точки полёта БПЛА, $\langle x_n, y_n \rangle$ — координаты конечной точки полёта БПЛА.

Стрелка \rightarrow в выражении (1) отражает отрезок прямой линии с соответствующими координатами начальной $\langle x_i, y_i \rangle$ и конечной $\langle x_{i+1}, y_{i+1} \rangle$ точек этого отрезка. Точка с координатами $\langle x_{i+1}, y_{i+1} \rangle$ — это точка на плоскости, где происходит изменение направления полёта БПЛА. Такую точку будем называть контрольной точкой маршрута. Возникновение контрольной точки обусловлено тем, что при движении БПЛА по отрезку прямой от точки с координатами $\langle x_i, y_i \rangle$ до точки $\langle x_{i+1}, y_{i+1} \rangle$ в точке $\langle x_{i+1}, y_{i+1} \rangle$ возникает препятствие, которое следует обойти, т. е. дальнейшее движение БПЛА будет осуществляться по прямой линии $(\langle x_{i+1}, y_{i+1} \rangle \rightarrow \langle x_{i+2}, y_{i+2} \rangle)$.

Отрезки прямых, составляющих элементы маршрута полёта БПЛА, обозначим номерами $i = 1, 2, \dots, n$.

Если маршрутов, определяемых выражением (1), несколько, то для каждого такого маршрута с номером $k = 1, 2, \dots, j, \dots, J$, где J — количество таких маршрутов, можно определить его количественную оценку, связанную с его длиной и весовым коэффициентом выгодности. Весовой коэффициент в рассматриваемой задаче можно трактовать различными способами. К примеру, он может иметь смысл расстояния, времени или стоимости полёта. Исходя из предположения, что объект поставленной задачи — БПЛА — летит с постоянной скоростью (иными словами, импульс БПЛА постоянен), расстояние и время в данном контексте имеют равнозначную смысловую нагрузку. В данной работе для конкретизации будем подразумевать под весовым коэффициентом выгодности выбираемого маршрута расстояние между контрольными точками маршрута. Обозначим этот параметр как C_{ij} , где $i = 1, 2, \dots, n$ (n — количество кон-

трольных точек в маршруте с номером j). Весовой коэффициент в широком смысле может учитывать рельеф, что позволяет перейти от двумерной траектории к трёхмерной, а также учитывать иные особенности траектории и подстилающей поверхности.

Для выбора оптимального маршрута БПЛА при противодействующих, погодных и географических ограничениях, кроме координат начальной и конечной точек полёта, считается известной следующая информация (входные данные; см. рис. 1):

- координаты начальной точки полёта $\langle X_{нт}, Y_{нт} \rangle$;
- координаты конечной точки полёта $\langle X_{кт}, Y_{кт} \rangle$;
- координаты горных массивов $\langle X_{гмл}, Y_{гмл} \rangle$, $\langle X_{гмп}, Y_{гмп} \rangle$ (для простоты горные массивы заданы описывающим прямоугольником, задаваемым точками диагонали);
- координаты зон сильных порывов ветра $\langle X_{спв}, Y_{спв} \rangle$;
- координаты противодействующих объектов $\langle X_{по}, Y_{по} \rangle$;
- радиус зон сильных порывов ветра $\langle \text{РадиусЗСПВ} \rangle$;
- скорость порывов ветра $\langle \text{СкоростьЗСПВ} \rangle$;
- радиусы действия противодействующих объектов $\langle \text{РадиусПрО} \rangle$;
- вероятность попадания противодействующего объекта по БПЛА $\langle \text{ВП} \rangle$;
- вероятности выхода из строя БПЛА $\langle \text{ВВИС} \rangle$.

Все координаты, а также $\langle \text{РадиусЗСПВ} \rangle$, $\langle \text{СкоростьЗСПВ} \rangle$, $\langle \text{РадиусПрО} \rangle$, $\langle \text{ВП} \rangle$, $\langle \text{ВВИС} \rangle$ вводятся в поля формы соответственно и хранятся во входном файле.

Кроме того, вводится карта рельефа местности.

На рис. 1 приведён пример изображения карты местности с координатами горных массивов (прямоугольники), сильных порывов ветра (окружность 1, 2) и противодействующих объектов (окружности 3—5).

Противодействующие объекты

Добавить объект Удалить с карты

X: Y: R: Rk:

Сохранить

Прочность БПЛА

Выходание из строя при 1 попадании [%]:

Выходание из строя при 2 попаданиях [%]:

Выходание из строя при 3 попаданиях [%]:

Начальная точка Указать на карте

X: Y:

Конечная точка Указать на карте

X: Y:

Зоны сильных порывов ветра

Добавить объект Удалить с карты

X: Y: R: V: [m/s]

Сохранить

Горные массивы

Добавить объект Удалить с карты Сохранить

X1: Y1: X2: Y2:

Указать на карте

X:226 Y:579

Рис. 1. Пример изображения карты местности с координатами горных массивов (прямоугольники), сильных порывов ветра (окружность 1, 2) и противодействующих объектов (окружности 3—5)

Результатом решения задачи в программном обеспечении является текстовый файл, содержащий следующую информацию (выходные данные):

- число контрольных точек маршрута полёта;
- координаты контрольных точек маршрута полёта БПЛА;
- длина маршрута полёта БПЛА;
- вероятность выхода из строя БПЛА на выбранном маршруте;
- зоны сильных порывов ветра, находящиеся на выбранном маршруте;
- координаты зон сильных порывов ветра, находящихся на выбранном маршруте.

Аналитическое описание задачи

Критерием оптимальности будем считать минимальность расстояния маршрута при ограничениях (в виде препятствующих объектов, горных рельефов и зон сильных порывов ветра) в области полёта. В таком случае перейдём к более подробному рассмотрению непосредственно целевой функции и системы ограничений.

Целевая функция в общем виде с учётом изложенного имеет следующий вид:

$$Z = \min_{j=1, \dots, J} \{Z_j\}, \quad (2)$$

где Z_j вычисляется по формуле $Z_j = \sum_{i=1}^{n_j} C_{ij}$ (n_j — количество отрезков прямой линии в маршруте с номером j).

Рассмотрим ограничения.

Ограничения по противодействующим объектам. Пусть заданы:

- l — количество возможных выстрелов по БПЛА с противодействующего объекта;
- $P(k)$ — вероятность того, что противодействующий объект с номером k ($k = 1, \dots, K$) при открытии огня попадёт в цель — БПЛА;
- A — событие, означающее, что БПЛА выведен из строя;
- $P(H_i)$ — вероятность того, что по БПЛА совершено i попаданий ($i = 1, \dots, l$);
- $P(A/H_i)$ — вероятность того, что при i ($i = 1, \dots, l$) попаданий по БПЛА он будет выведен из строя;
- K — количество противодействующих объектов.

Вероятность $P(A)$ того, что БПЛА выведен из строя, можно вычислить по формуле полной вероятности.

Иными словами, вероятность события A , или вероятность вывести из строя БПЛА, есть сумма вероятностей того, что по БПЛА попадут и попадание будет критическим.

Вероятность свершения гипотезы H_i можно вычислить, исходя из следующих соображений: вероятность того, что попадёт только один противодействующий объект, есть вероятность того, что попадёт первый объект и не попадут остальные, или вероятность того, что попадёт только второй объект, и так далее по всем противодействующим объектам. Аналогичные рассуждения проводятся при попадании по БПЛА двух объектов и более. Эти соображения позволяют вычислить вероятность свершения гипотезы H_i по следующей формуле:

$$P(H_i) = \sum_{l=1}^{C_K^i} \prod_{i \in I} P_{il}(k) \prod_{j \notin I} [1 - P_{jl}(k)], \quad (3)$$

где I — множество противодействующих объектов, попавших в цель — БПЛА;

$P_{il}(k)$ — вероятность того, что объект с номером k попадёт i раз в комбинации попаданий и промахов с номером l ($l = 1, \dots, C_K^i$);

$P_{jl}(k)$ — вероятность того, что объект с номером k не попадёт j раз в комбинации попаданий и промахов с номером l ($l = 1, \dots, C_K^i$);

C_K^i — число сочетаний без повторений.

Ограничения по погодным условиям. Рассмотрим ограничения, представляющие собой области с неблагоприятными для полёта погодными условиями только в виде порывов ветра различной скорости. В целях упрощения алгоритма другие погодные факторы не учитываются.

Пусть:

- m — количество встреченных на пути зон с сильными порывами ветра;
- N_i — выдвигаемая гипотеза о том, что в зоне i ($i = 1, \dots, m$) БПЛА теряет управление;
- B — событие, означающее, что БПЛА выведен из строя;
- $P(N_i)$ — вероятность того, что в зоне i ($i = 1, \dots, m$) БПЛА потеряет управление;
- $P(B/N_i)$ — вероятность того, что в зоне i ($i = 1, \dots, m$) после потери управления БПЛА будет выведен из строя.

В таком случае можно перейти к формированию ограничений при помощи формулы полной вероятности свершения события $P(B)$.

Будем считать, что в зонах сильного потока ветра вероятность потери управления равнозначна.

- Вероятность свершения гипотезы N_i будет зависеть от силы порыва ветра. Примем, что БПЛА движется без потери управления на скорости порывов ветра до 15 м/с и выход из строя происходит при скорости порывов ветра свыше 30 м/с [8]. Зададимся вероятностями выведения

БПЛА из строя при различных скоростях порывов ветра:

- при скорости < 15 м/с $P(B/N_1) = 0$;
- при скорости от 15 до 20 м/с $P(B/N_2) = 0,3$;
- при скорости от 20 до 25 м/с $P(B/N_3) = 0,6$;
- при скорости от 25 до 30 м/с $P(B/N_4) = 0,9$;
- при скорости > 30 м/с $P(B/N_5) = 1,0$.

Будем считать все гипотезы N_i ($i = 1, \dots, m$) равновероятными и рассчитывать $P(N_i)$ как $P(N_i) = 1/m$.

Вероятность вывода из строя БПЛА $P(Z_j)$ с учётом влияния противодействующих объектов и погодных условий можно вычислить по формуле

$$P(Z_j) = P(A_j) + P(B_j) - P(A_j)P(B_j), \quad (4)$$

где $P(A_j)$ и $P(B_j)$ вычисляются по формулам полной вероятности для маршрута с номером j .

С учётом всех противодействующих факторов конечную приведённую целевую функцию в задаче выбора оптимального маршрута полёта БПЛА от исходной точки $\langle x_0, y_0 \rangle$ до конечной $\langle x_n, y_n \rangle$ можно определить следующим образом:

$$\bar{Z} = \min_{j=1, \dots, J} \left\{ \frac{Z_j [1 + P(Z_j)]}{D_N} \right\}, \quad (5)$$

где $P(Z_j)$ вычисляется по формуле (4), а значение D_N равно наикратчайшему пути (минимальным затратам) между начальной и конечной точками.

Указанное приведение позволяет получить кратность затрат рассчитанного маршрута по сравнению с минимальными как значение целевой функции.

Географические ограничения. Географические ограничения, к которым можно отнести горный массив, закрытые территории, в том числе территории иных стран без согласования над ними пролёта, исключаются из рассматриваемой возможной области прокладки маршрута.

Алгоритм

При решении поставленной задачи были рассмотрены различные алгоритмы нахождения

кратчайшего пути и использован эвристический алгоритм — метод муравьиных колоний, основанный на поведении реальных муравьиных колоний в природе [6, 7]. Данный алгоритм хорошо подходит для задач больших размерностей, таких, как решаемая задача, и может подстраиваться под динамические системы, что в дальнейшем позволит учитывать динамические свойства ветра и возможность передвижения противодействующих объектов.

Для работы алгоритма потребуется задание следующих параметров:

- количество особей в колонии муравьёв;
- интенсивность испарения феромона. При большой интенсивности испарения решение быстро вырождается;
- параметр, определяющий "жадность" алгоритма. В случае равенства данного параметра нулю алгоритм переходит в разряд "жадных";
- параметр, характеризующий зависимость выбора направления от опыта других муравьёв. При равенстве нулю этого параметра алгоритм может заикнуться в области локально оптимального решения;
- параметр видимости муравья;
- общее количество феромона у каждого из муравьёв;
- количество "элитных" муравьёв.

Каждая итерация прохождения муравьёв представляет собой для каждого муравья поиск какого-либо маршрута. Вершины для перехода выбираются случайно исходя из вероятностей. При прохождении муравьём какой-либо дуги она помечается феромоном. Чем больше концентрация феромона на дуге, тем вероятней будет произведён выбор именно этой дуги другими муравьями в дальнейших итерациях [7].

Оптимальным маршрутом итерации будет считаться тот, на котором феромона окажется больше всего с учётом вероятностей выживания БПЛА. По такому пути будет осуществляться прохождение "элитных" муравьёв, целью которых является увеличение концентрации феромона на найденном пути для лучшей сходимости.

В качестве критерия остановки работы алгоритма будем рассматривать величину, характеризующую изменение пути за последние n итераций. Если оптимальный путь после завершения итерации с номером n будет отличаться от оптимального пути, найденного на итерации $n - 1$, на некоторое малое значение ε , то работу алгоритма можно считать завершённой.

Схема алгоритма рассматриваемой задачи выбора оптимального маршрута БПЛА представлена на рис. 2.

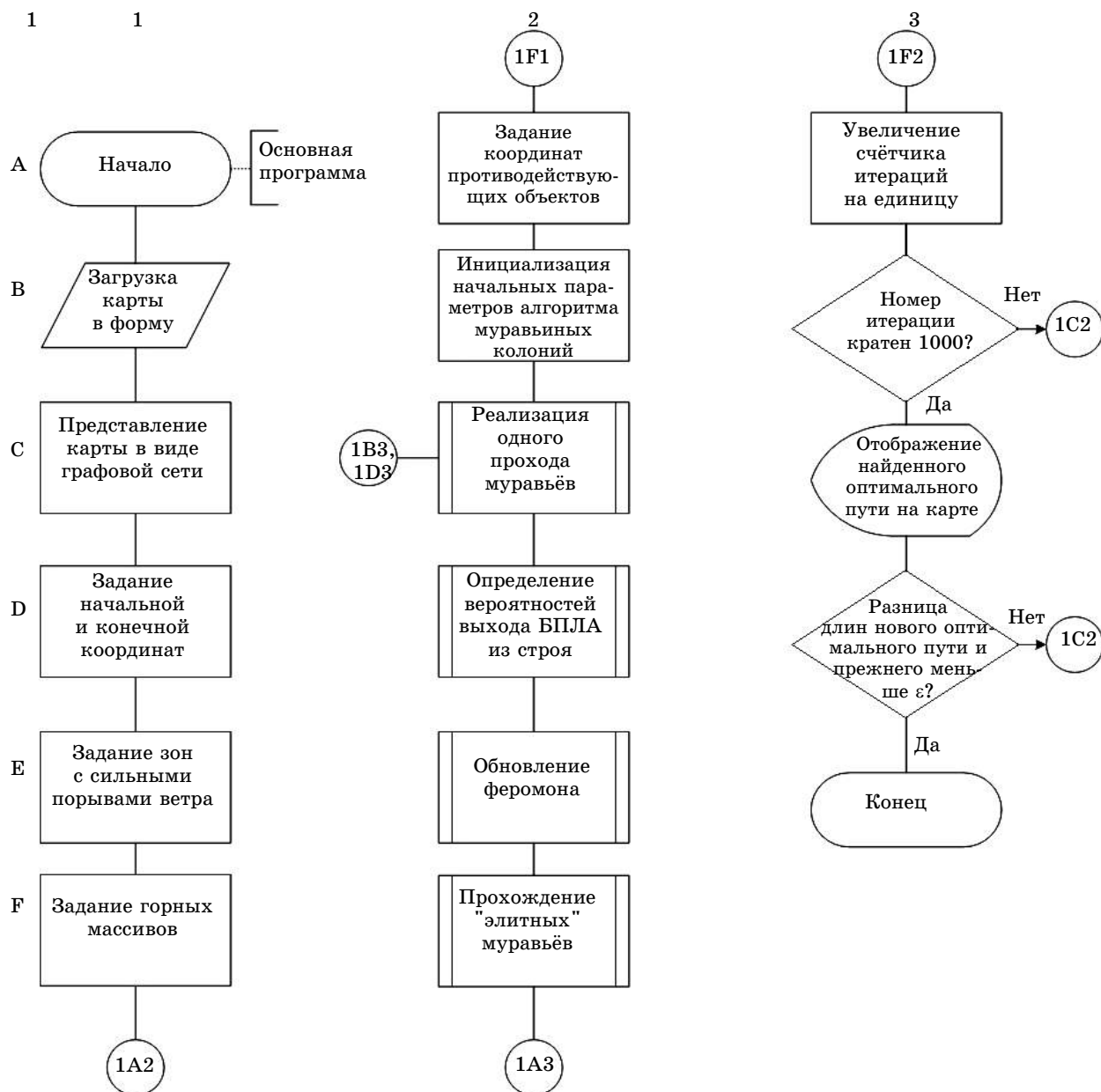


Рис. 2. Схема алгоритма выбора оптимального маршрута БПЛА

Выбор программного обеспечения для реализации решения задачи

Программное обеспечение реализовано в среде разработки Visual Studio 2015 [9] на двух языках программирования. Графический модуль программного обеспечения написан на языке C# [10] на фреймворке .Net Framework 4 с набором библиотек Windows Forms. Вычислительный модуль, реализующий основной алгоритм, написан на языке программирования C++ [11].

Все данные, введённые в графическом модуле программного обеспечения, записываются в файл, из которого производится чтение вычислительным модулем для дальнейшей работы программного обеспечения.

Пример решения задачи

В качестве исходных данных примем следующие:

- начальная точка полёта БПЛА имеет координаты на плоскости (74, 294) (в у. е.);
- конечная точка полёта БПЛА имеет координаты на плоскости (373, 29) (в у. е.).

Значения параметров противодействующих ограничений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения параметров противодействующих объектов

Параметр	ПО № 1	ПО № 2	ПО № 3
Координаты	(325, 68)	(267, 141)	(177, 392)
Радиус действия	25	20	35
Вероятность попадания	15	25	50

Значения параметров погодных ограничений приведены в табл. 2, географических ограничений — в табл. 3.

Таблица 2

Значения параметров погодных ограничений

Параметр	ЗСПВ № 1	ЗСПВ № 2
Координаты	(111, 200)	(312, 277)
Радиус зоны сильных порывов ветра	30	50
Скорость порывов ветра	18	20

Таблица 3

Зоны горных массивов

Координаты	ГМ № 1	ГМ № 2	ГМ № 3
Левого угла	(164, 182)	(312, 123)	(330, 313)
Правого угла	(279, 283)	(372, 222)	(448, 440)

Вероятность выхода из строя при первом попадании 15 %.

Вероятность выхода из строя при втором попадании 40 %.

Вероятность выхода из строя при третьем попадании 75 %.

В качестве параметров алгоритма муравьиных колоний были приняты следующие:

- количество особей в колонии 16;
- интенсивность испарения феромона 0,5;
- параметр, определяющий "жадность" алгоритма, 1;
- параметр, характеризующий зависимость выбора направления от опыта других муравьёв, 4;
- общее количество феромона у каждого из муравьёв 100;
- количество "элитных" муравьёв 5.

В результате работы алгоритма найден оптимальный маршрут полёта БПЛА, состоящий из 7 точек, включая точки начала и завершения полёта. Длина маршрута составляет 446 условных единиц, а значение целевой функции — 1,12, т. е. затраты на маршрут превышают минимальные в 1,12 раза.

Результаты решения задач определения оптимального маршрута полёта БПЛА на карте местности приведены на рис. 3, где оптимальный маршрут обозначен отрезками прямой линии.

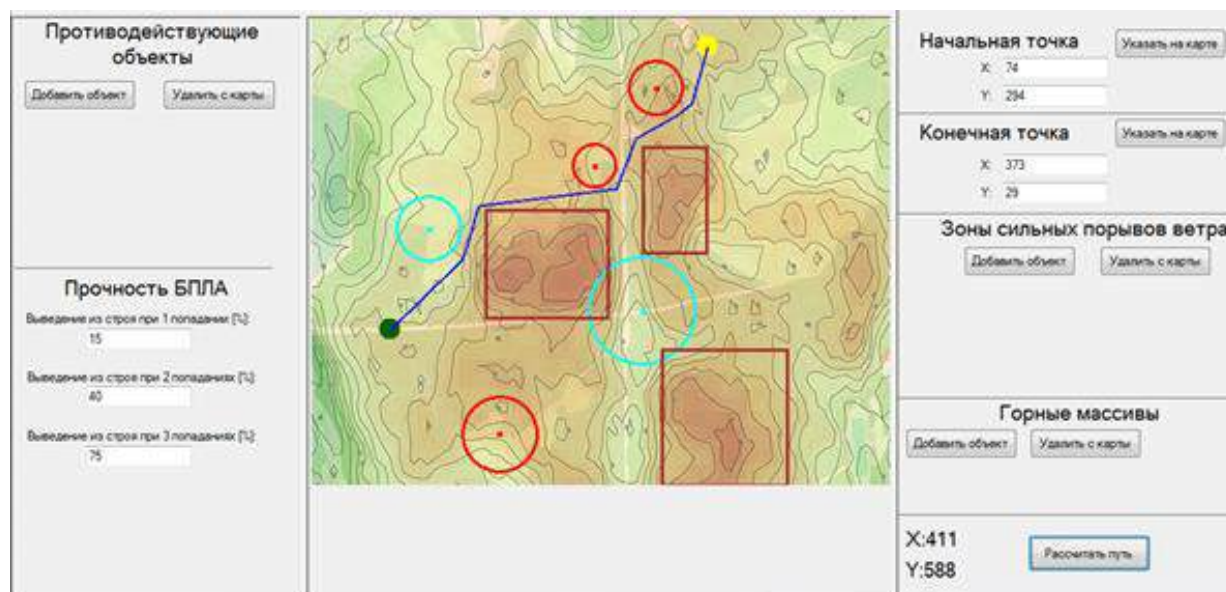


Рис. 3. Оптимальный маршрут БПЛА на карте местности

Заключение

В работе рассмотрены подходы к выбору оптимального маршрута беспилотного летательного аппарата.

Для решения задачи выбора оптимального маршрута описаны целевая функция, множество ограничений и использован эвристический алгоритм — метод муравьиных колоний.

Разработаны алгоритм и программное обеспечение для решения задачи с использованием алгоритма муравьиных колоний.

В результате решения задачи представлен пример выбора оптимального маршрута при

противодействующих, погодных и географических ограничениях в области полёта.

В дальнейшем разработанное программное обеспечение может быть дополнено другими погодными ограничениями, включая динамические и стохастические свойства погодных явлений.

Авторы благодарят заведующего кафедрой 304 МАИ, проф., д-ра техн. наук Брехова Олега Михайловича за его опыт и помощь во всех аспектах исследования и за помощь в написании статьи.

Литература

1. Применение беспилотных летательных аппаратов в гражданских целях [Электронный ресурс]. URL: http://www.uav.ru/articles/civil_uav_th.pdf
2. Лебедев Г. Н., Румакина А. В. Система логического управления обхода препятствий беспилотного летательного аппарата при маршрутном полёте // Труды МАИ. 2015. № 83. С. 5.
3. Попов А. Н., Тетерин Д. П. Методы планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата с учетом противодействия противника // Изв. Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19. № 1-2. С. 371—376.
4. Батраева И. А., Тетерин Д. П. Алгоритм планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата при выполнении поисково-спасательных операций // Изв. Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20. № 6. С. 210—214.
5. Васильченко А. С., Иванов М. С., Малышев М. С. Формирование полётных зон беспилотных летательных аппаратов по степени устойчивости управления ими в условиях применения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 262—279.
6. Павленко А. И., Титов Ю. П. Сравнительный анализ модифицированных методов муравьиных колоний // Прикладная информатика. 2012. № 4(40). С. 100—112.
7. Титов Ю. П. Модификации метода муравьиных колоний для решения задач разработки авиационных маршрутов // Автоматика и телемеханика. 2015. Вып. 3. С. 108—124.
8. Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами: Сборник / под ред. Бодрова А. С., Безденежных С. И. — Коломна: Государственный центр беспилотной авиации Министерства обороны Российской Федерации, 2016. — 274 с.
9. Интегрированная среда разработки Visual Studio [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/visualstudio/ide/visual-studio-ide?view=vs-2015> (дата обращения: 13.03.2021).
10. Руководство по программированию на C# [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/csharp/programming-guide/> (дата обращения: 13.03.2021).
11. Документация по языку C++ [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/cpp/cpp/?view=msvc-160> (дата обращения: 13.03.2021).

THE PROBLEM OF CHOOSING THE OPTIMAL ROUTE FOR AN UNMANNED AERIAL VEHICLE WITH OPPOSING, GEOGRAPHIC AND WEATHER RESTRICTIONS IN THE FLIGHT AREA

K. E. Lavrenov, A. P. Shevelyova, O. T. Romanov, M. N. Mashkin
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

The issues of finding the optimal route for an unmanned aerial vehicle under opposing geographic and weather constraints are considered. An algorithm and software have been developed for solving the problem and using the ant colony algorithm.

Keywords: unmanned aerial vehicle, optimization, ant colonies, wind, relief, opposing objects.

Лавренов Кирилл Евгеньевич, бакалавр.
E-mail: lavren.kir@gmail.com.
Шевелёва Анастасия Петровна, бакалавр.
E-mail: nasshev13@yandex.ru
Романов Олег Тимофеевич, доцент.
E-mail: r860909@yandex.ru
Машкин Михаил Николаевич, доцент.
E-mail: mnmarshkin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 9 августа 2021 г.

УДК 620.1.08

DOI: 10.52190/2073-2597_2021_4_29

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ОПТИЧЕСКИХ СТЕРЕОСИСТЕМ

П. М. Николаев, д-р техн. наук; А. О. Шардин; А. В. Левицкий; А. А. Никуленко;
А. А. Юстус; М. А. Ларютина, канд. техн. наук
ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского»,
г. Жуковский, Московская обл., Россия

Предложены способы повышения эффективности алгоритмов, используемых для обработки результатов измерений, полученных с помощью оптических сканирующих систем для контроля формы наледи в экспериментальных исследованиях в аэрохолодильных трубах. Подобные результаты измерений характеризуются большим объемом данных (обычно более 10^6 точек) и требуют значительного времени на их обработку разработанными ранее методами. Показано, что наиболее затратные с точки зрения машинного времени части расчетных алгоритмов включают поиск точки на поверхности, ближайшей к заданной точке, а также расчет точки на поверхности при выполнении программы в многопоточном режиме. Представлены соответствующие способы сокращения времени расчета, основанные на пространственной когерентности измеренных точек, выборке ограниченного числа точек для первоначального совмещения замера и модели, а также использовании возможностей современной вычислительной техники по многопоточному выполнению программ. Приведены требования к алгоритмам расчета точки на поверхности в многопоточной среде.

Ключевые слова: математическая модель, координатные измерения, оптические сканирующие системы, аэродинамическая модель, форма льда.

Задача измерения формы льда, образующегося на аэродинамических поверхностях летательных аппаратов при полете в условиях обледенения, является чрезвычайно важной прежде всего для обеспечения безопасности полетов. Для исследования влияния обледенения на аэродинамические характеристики летательных аппаратов проводят экспериментальные исследования в аэрохолодильных трубах. В рамках данных исследований могут быть определены форма, размер и положение наледи на аэродинамической поверхности и проведено их сравнение с расчетными формами и размерами.

В отличие от контроля точности изготовления формообразующей технологической оснастки (пресс-формы, штампы, литейные формы и т. д.), широко применяемого в машиностроении, получение формы льда путем измерений имеет ряд особенностей, которые рассматриваются в данной статье. Прежде всего, в силу физических характеристик льда имеются определенные ограничения по возможностям проведения контактных измерений. Поэтому рациональным представляется применение оптических измерительных систем, выполняющих сканирование объектов [1].

Вопросы обработки измерений преобладающего объема изделий общего машиностроения достаточно полно рассмотрены в литературе [2, 3]. В работах [4, 5] представлены методика и базовые алгоритмы проведения контроля точности изготовления аэродинамических моделей самолетов. Основу соответствующих алгоритмов составляет сопоставление математической (цифровой) модели изделия с материалами измерений

изготовленного образца. Главной проблемой является несовпадение баз (систем координат) измерительной машины и математической модели изделия (рис. 1). Для сравнения результатов измерений с эталонной математической моделью необходимо предварительно произвести процедуру их наилучшего совмещения.

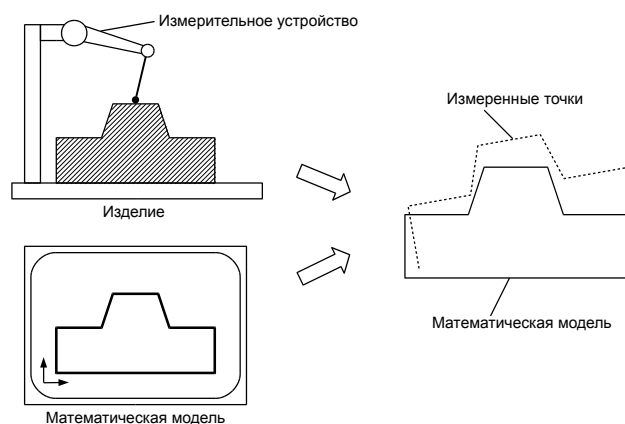


Рис. 1. Несовпадение баз измеренных точек и математической модели

Алгоритм совмещения измеренных точек с математической моделью изделия, описанный в работах [4, 5], основан на минимизации расстояния между совокупностью измеренных точек и соответствующими им точками на математической модели. В качестве критерия соответствия используют наименьшее расстояние между измеренной точкой и точкой, лежащей на модели. Минимизация суммы квадратов расстояний от

измеренных точек до найденных соответствующих точек математической модели определяет параметры их наилучшего совмещения — поворот и сдвиг (рис. 2).

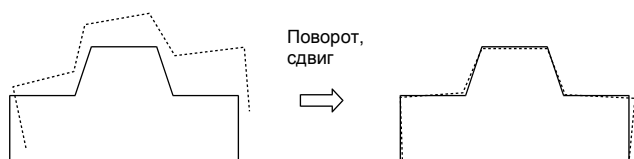


Рис. 2. Совмещение измеренных точек с математической моделью

При данном подходе для каждой измеренной точки необходимо выполнить поиск ближайшей точки, лежащей на поверхности математической модели изделия. Процедура поиска ближайшей точки на поверхности описана в работе [6]. Она основана на переборе различных точек начальных приближений с последующим итерационным уточнением. Измерения времени расчета различных частей общего алгоритма обработки результатов измерений показывают, что на поиск точек на поверхности, ближайших к измеренным точкам, тратится больше всего времени (до 90 %). Массив измеренных точек, полученных в результате сканирования с помощью оптической системы, характеризуется большим объемом данных (10^6 и более точек), что влечет за собой значительное увеличение времени расчета. Поэтому выходит на передний план задача повышения эффективности соответствующих алгоритмов. Далее рассмотрим несколько способов модификации базовых алгоритмов, использующих специфику входных данных, а также возможности современной вычислительной техники и позволяющих сократить время расчета до приемлемых значений.

Использование пространственной когерентности точек

Для определения направлений модификации расчетных алгоритмов обработки результатов измерений в целях повышения их эффективности рассмотрим детали реализации наиболее затратной с точки зрения времени работы процедуры поиска точки на поверхности, ближайшей к заданной измеренной точке.

Ряд поверхностей относительно простой формы (например, сфера, плоскость, тор) позволяет получить аналитическое решение данной задачи. Однако в общем случае для произвольно заданной поверхности аналитического решения не существует и необходимо применять итерационный метод.

Итерационный метод поиска ближайшей точки на поверхности подразумевает наличие начального приближения, которое затем уточняется. При этом найденное решение будет иметь локальный характер относительно полной

поверхности. На рис. 3 показан пример плоского сечения волнистой поверхности. В зависимости от начального приближения будет найдено одно из решений (B_1 , B_2 или B_3) точки, ближайшей к точке A .

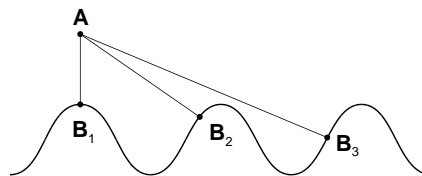


Рис. 3. Локальные минимумы расстояний от точки до поверхности

Для поиска глобального минимума используют некоторое количество точек начального приближения. Их положение можно выбрать, исходя из способа описания поверхности. Например, для поверхностей Безье или NURBS [7] может быть использован опорный каркас. Если такой информации не имеется, то применяется двумерный массив в виде сетки точек, расположенных с заданным шагом на всей поверхности. Именно такой способ задания начальных приближений описан в работе [6]. Размерность массива точек начальных приближений определяет вероятность нахождения реального значения минимума для всей поверхности, т. е. чем больше точек, тем меньше вероятность пропустить локальный экстремум. На практике используют сетки порядка 100×100 с применением различных габаритных проверок для отсеивания части точек [6]. Даже при наличии габаритных проверок на перебор всех начальных приближений с запуском итерационного процесса уточнения для каждого начального приближения тратится значительное время.

Для произвольно заданных измеренных точек (облако точек) описанный подход представляется безальтернативным. Однако в случае получения результатов измерений со сканирующих оптических устройств имеется определенная закономерность в расположении точек: они располагаются в виде последовательных строк. Каждая следующая точка замера расположена в непосредственной близости от предыдущей (рис. 4), т. е. имеет место пространственная когерентность. Это свойство можно использовать для повышения эффективности расчета.

На рис. 5 изображены математическая модель и ряд измеренных точек. Видно, что для расчета точки B_2 , ближайшей к A_2 , можно использовать точку B_1 в качестве начального приближения, затем — точку B_2 для поиска B_3 и т. д. до конца строки сканирования оптической системы. Подобная модификация алгоритма позволяет существенно сократить общее время расчета. Количественные показатели времени

выполнения модифицированного алгоритма приведены в конце работы на тестовом примере.

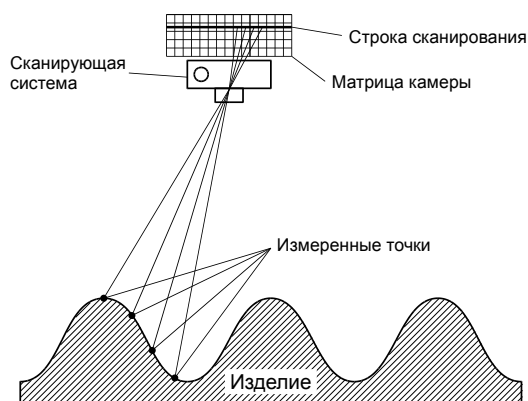


Рис. 4. Построчное сканирование изделия

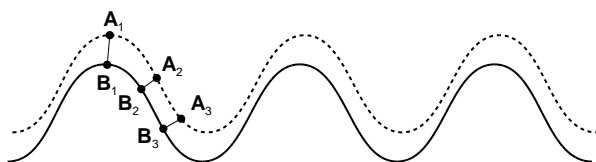


Рис. 5. Близкое расположение последовательных точек

Выборка ограниченного числа точек для предварительного совмещения

Процедура совмещения точек замеров с математической моделью изделия, описанная в работе [5], основана на линеаризации матрицы поворота. Поэтому параметры наилучшего совмещения (поворот и сдвиг) определяются итерационно. Каждая итерация предполагает расчет точек на поверхности, ближайших к измеренным точкам.

В начале расчета на первой итерации измеренные точки могут находиться достаточно далеко от поверхности. При этом часть точек будет иметь соответствующие им ближайшие точки на модели не в том месте, где нужно. На рис. 6, а изображены математическая модель и контур измеренных точек. Для точки А ближайшей точкой на модели будет В, хотя из рисунка видно, что окончательное положение точки А после совмещения замера с моделью должно находиться в районе точки С (рис. 6, б).

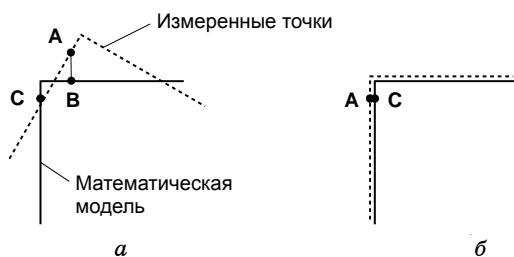


Рис. 6. Несоответствие ближайшей к А точки В ее конечному положению С

Такое несоответствие в ряде точек не повлияет на конечный результат совмещения. После нескольких итераций точки замеров займут нужное положение. Однако возникает вопрос: стоит ли при первых итерациях использовать весь массив измеренных точек? Опыт практического применения процедуры определения параметров совмещения показал, что для нескольких первых итераций достаточно брать порядка 10 % измеренных точек. Такое сокращение размера входных данных для предварительного совмещения внесет дополнительный вклад в уменьшение общего времени расчета.

Отдельно стоит рассмотреть случай, когда имеется значительное рассогласование баз измерительной машины и математической модели, т. е. когда точки замеров и модель будут находиться далеко друг от друга (рис. 7).

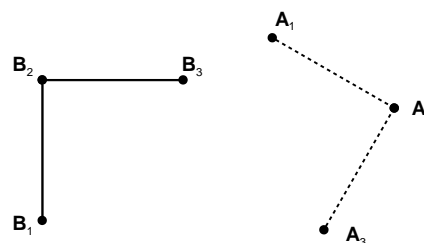


Рис. 7. Значительное рассогласование баз

В этой ситуации необходимо воспользоваться процедурой ручного предварительного базирования, описанной в работе [4]. Для этого оператор в ручном режиме выбирает несколько (3–6) характерных точек математической модели (B_1, B_2, B_3 на рис. 7), а также соответствующие им точки замеров (A_1, A_2, A_3). Процедура совмещения на основании введенных данных определяет параметры поворота и сдвига для предварительного согласования баз замера и модели, что позволяет запустить дальнейший расчет в автоматическом режиме.

Расчет ближайших точек на модели в режиме параллельных вычислений

Современные компьютеры имеют, как правило, несколько вычислительных устройств — процессоров или процессорных ядер, дающих возможность выполнять расчеты в параллельном режиме. Средства разработчика программного обеспечения позволяют создавать эффективный многопоточный код, предоставляя необходимый набор базовых строительных блоков и удобную среду отладки программ. В этих условиях, если организовать структуру программы так, чтобы расчетная нагрузка распределялась равномерно по всем доступным вычислительным единицам (процессорам, ядрам), то общее время выполнения должно уменьшиться.

Рассматриваемая задача обработки результатов измерений, полученных с оптической си-

стемы, может быть разделена на части для параллельного выполнения в разных потоках. Это обусловлено тем, что поиск отдельной точки на поверхности, ближайшей к заданной, может быть выполнен независимо от остальных точек. Поэтому для повышения эффективности имеет смысл разделить весь массив измеренных точек на части и осуществить расчет в параллельно выполняющихся потоках, количество которых определяется числом доступных вычислительных единиц.

Для сохранения пространственной когерентности данных массив точек можно разбивать на отдельные части в виде последовательно отсканированных полос в соответствии с матрицей оптической системы.

Организация эффективного расчета, выполняющегося в параллельном режиме, предполагает наличие некоторых условий к разработке программной реализации. В частности, в расчетных процедурах должны отсутствовать взаимные блокировки, снижающие степень параллелизма. Подобные блокировки необходимы, когда требуется совместный доступ к модифицируемому данным, что влечет за собой ожидание завершения сегментов кода программы между отдельными потоками.

Процедура поиска точки на поверхности, ближайшей к заданной точке, использует при расчете только локальные данные, поэтому нет необходимости использовать средства синхронизации между потоками. Однако функции расчета точки на поверхности, задействованные в данном алгоритме, могут иметь внутреннюю организацию, включающую наличие совместно используемых данных. Например, программная реализация расчета точки NURBS-поверхности, выполненная согласно алгоритму, взятому из классической работы [7], не подходит для использования в многопоточных программах вследствие наличия внутреннего буфера для временных данных. В работах [8, 9] описаны способы модификации алгоритма расчета NURBS-поверхностей для задач параллельного программирования. В этих работах показано, что исключение блокировок позволяет сократить время расчета практически пропорционально увеличению числа вычислительных процессоров.

Заключение

Рассмотренные модификации алгоритмов совмещения измеренных точек с математической моделью объекта послужили математической основой для разработки расчетных программных модулей, обрабатывающих результаты трехмерного сканирования наледи, образующейся на аэродинамических поверхностях в рамках экспериментов в аэрохолодильной трубе.

Для сравнения времени выполнения немодифицированных расчетных алгоритмов и алгоритмов с предлагаемыми модификациями была

проведена обработка результатов сканирования тестовой детали (рис. 8).

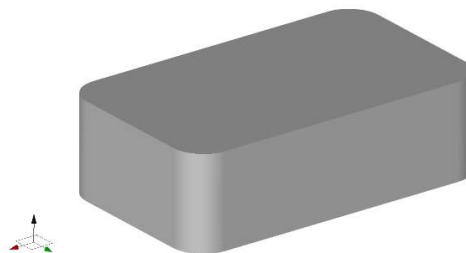


Рис. 8. Тестовая деталь

Размер детали 50×30×15 мм. Число измеренных точек — порядка 10^5 . Вычисления проводили на компьютере с процессором Intel® Core™ i7-10700K 3.80GHz (8 вычислительных ядер) и оперативной памятью 64 GB. Обработка результатов измерений с использованием немодифицированных алгоритмов потребовала 45 мин, что является неприемлемым с точки зрения практического использования, особенно с учетом относительно простой детали. Модифицированный алгоритм, учитывающий когерентность данных и использующий ограниченное число точек на первой итерации, был выполнен за 5 мин. Расчет в режиме параллельных вычислений с задействованием 8 потоков позволил дополнительно уменьшить общее время выполнения до 2 мин. Таким образом, предложенные модификации расчетных алгоритмов, учитывающие специфику конкретной области применения, обеспечили существенное повышение эффективности выполнения задачи обработки результатов измерений, полученных с оптических сканирующих систем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-13009.

Литература

1. Николаев П. М., Шардин А. О., Левицкий А. В., Никуленко А. А., Юстус А. А. Особенности построения трехмерной математической модели с использованием сканирующей стереосистемы с инфракрасной подсветкой: мате. IV Отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов. — г. Жуковский, 2020. С. 143—148.
2. Дунин-Барковский И., Журавлев А., Коротков В. Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1972.
3. Грановский В., Сирая Т. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. — Л.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Вермель В. Д., Дроздовский А. Ю., Забалуев В. Ф., Николаев П. М. Оценка точности изготовления аэродинамических моделей самолетов // Приборы. 2010. № 8. С. 23—29.

5. Николаев П. М. Алгоритм совмещения измеренных точек и математической модели изделия с использованием локальной линеаризации поверхности // Приборы. 2014. № 9. С. 44—48.

6. Николаев П. М. Алгоритм поиска точки на параметрической поверхности, ближайшей к заданной точке, для задач контроля точности изготовления изделий // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. № 3. С. 135—137.

7. Piegl L., Tiller W. The NURBS Book. Second edition. — N. Y.: Springer, 1996. — 646 p.

8. Николаев П. М. Использование локальной памяти потока для расчета В-сплайнов в задачах параллельного программирования // Программная инженерия. 2019. Т. 10. № 4. С. 178—185.

9. Николаев П. М. Повышение эффективности расчета В-сплайнов в задачах параллельного программирования // Программная инженерия. 2021. Т. 12. № 5. С. 267—273.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF PROCESSING MEASUREMENT RESULTS OBTAINED FROM OPTICAL STEREO SYSTEMS

P. M. Nikolaev, A. O. Shardin, A. V. Levitskiy, A. A. Nikulenko,
A. A. Ustus, M. A. Laryutina
Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Moscow region, Russia

Methods for increasing the efficiency of algorithms used for processing measurement results obtained using optical scanning systems for controlling the shape of ice in experimental studies in icing wind tunnels are proposed. Such measurement results are characterized by a large bulk of data (usually more than 10^6 points) and require a significant amount of time to process them using the previously developed methods. It is shown that the most expensive parts of the computational algorithms from the point of view of computer time include finding a point on the surface closest to a given point, as well as calculating a point on the surface when executing the program in multithreaded mode. The corresponding methods for reducing the computation time based on the spatial coherence of the measured points, sampling of a limited number of points for the initial alignment of the measurement and the model, as well as using the capabilities of modern computing technology for multithreaded program execution are presented. Requirements for algorithms for calculating a point on a surface in a multithreaded environment are given.

Keywords: mathematical model, coordinate measurements, optical scanning systems, aerodynamic model, ice shape.

Николаев Прокопий Михайлович, начальник отдела.

E-mail: prokopi.nikolaev@tsagi.ru

Шардин Антон Олегович, начальник отдела.

E-mail: ao_shardin@tsagi.ru

Левицкий Александр Вячеславович, инженер-конструктор 1-й категории.

E-mail: alexandr.levitskiy@tsagi.ru;

Никулenco Алексей Алексеевич, ведущий инженер-конструктор.

E-mail: aleksey.nikulenko@tsagi.ru

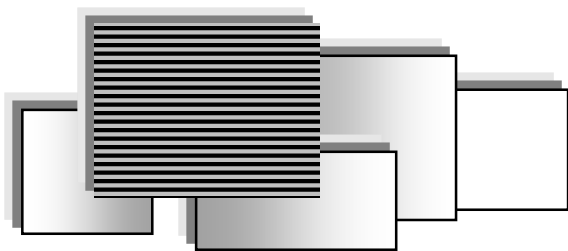
Юстус Александр Анатольевич, ведущий инженер.

E-mail: aleksandr.yustus@tsagi.ru

Ларютина Мария Александровна, научный сотрудник.

E-mail: marhang1@gmail.com

Статья поступила в редакцию 24 августа 2021 г.



ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 001.8: 005: 007: 16

DOI: 10.52190/2073-2597_2021_4_34

ФРАГМЕНТ МЕТАМЕТОДОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Е. И. Митрушкин, д-р техн. наук

АО "Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт автоматической аппаратуры им. академика В. С. Семенихина", Москва, Россия

Предложен фрагмент метаметодологии исследования автоматизированных систем — обобщённой иерархии известных подходов, уровней, научных методов и результатов исследования.

Ключевые слова: исследование автоматизированных систем, методология исследования, метаметодология исследования, подходы, методы и результаты исследования.

Методологии исследования автоматизированных систем

Начальной стадией жизненного цикла автоматизированных систем (АС) является исследование (обследование) [1] — творческая теоретическая и практическая, чувственная и мыслительная познавательная деятельность по изысканию, познанию, получению и применению новых объективных знаний о:

- существующем предмете автоматизации (системах, объектах, процессах);
- направлениях, путях, вариантах и организации автоматизации (создания АС) и т. п.

Следует отметить, что исследование АС и их составных частей не является прерогативой начальной стадии жизненного цикла. Оно проводится также в виде контроля, тестирования, испытаний и т. п. на всех последующих этапах, включая утилизацию и уничтожение [2].

Стратегией, генеральным путём научного исследования АС выступает его методология. Этот термин имеет ряд определений, в том числе:

- учение о структуре, логической организации, методах и средствах деятельности [3];
- совокупность процедур, приёмов и методов науки, объединённых в единую конструктивную программу и служащих средствами для постижения того или иного объекта научного знания [4];
- совокупность методов, используемых в той или иной области деятельности для реализации определённых целей [4].

Методология конкретного исследования сконцентрирована в его общем замысле, существе развернутых и проверяемых далее гипотез, в итоговом обобщении и теоретическом осмыслении полученных результатов [5].

Метаметодология исследования

Существующее многообразие методологий предопределяет необходимость создания обобщённой метаметодологии (т. е. методологии самой методологии). Этому редко используемому термину можно предложить несколько близких определений, в том числе:

- учение об общей структуре, логической организации, методах и средствах теоретических и практических исследований (в этом случае для термина "методология" целесообразно не использовать первое приведённое определение);
- система знаний об организации и методах теоретических и практических исследований;
- комплекс общих теоретических и практических знаний о постановке, организации и проведении исследований, обработке и использовании их результатов и т. д.

Такая метаметодология позволит обеспечить:

- общее видение и мировоззренческие основы исследований;
- деятельность и категориальный строй исследований;
- способы мыслительной и практической деятельности исследователей;

- базис для формирования методологии конкретного исследования;
- сокращение многозначности используемых терминов и т. д.

Фрагмент метаметодологии

Из-за многофакторности и сложности создания такой метаметодологии в данной работе только вариант её ядра или даже фрагмент.

Вариант фрагмента подобной метаметодологии исследования АС приведён на рисунке.

Фрагмент представлен в виде семи взаимосвязанных уровней (слоёв, страт), каждый из которых содержит варианты компонентов для выбора при формировании методологии конкретного исследования.

Компоненты метаметодологии

Рассмотрим краткое содержание каждого уровня представленного фрагмента метаметодологии.

1. Постановка исследования.

- Цель исследования — заранее намеченный, желаемый конечный результат исследования. Может излагаться в виде лозунга или вопроса: "Что должно быть достигнуто?".

- Задачи исследования — требуемая совокупность действий (работ), необходимых для

достижения цели исследования. Могут быть сформулированы в виде вопросов: "Что должно быть сделано для достижения цели исследования?".

- Критерии исследования — совокупность заданных или принятых количественных и качественных признаков, оснований, мерил, условий и решающих правил для оценки полноты (степени) и корректности выполнения задач и достижения цели исследования.

2. Вид (глубина) исследования.

- Фундаментальные исследования, направленные на получение, углубление и обобщение основополагающих знаний независимо от перспектив применения;

- Прикладные (поисковые) исследования, направленные на применение фундаментальных знаний для создания новых материалов, методов и технологий, решения крупных практических проблем;

- Разработки, внедряющие в практику результаты фундаментальных и прикладных исследований для создания новой и совершенствования существующей техники, конструкций, технологий и т. д.

3. Подход к исследованию.

- Диалектический подход — исследование предметов и явлений как взаимосвязанных, постоянно изменяющихся и развивающихся из-за своей внутренней противоречивости;



Вариант фрагмента метаметодологии исследования АС

• Системный подход, заключающийся в представлении исследуемого объекта в виде системы (единого целого), определении её места и роли в метасистеме (более общей системе), проведении системного анализа внутренних и внешних связей, структуры и организации исследуемого объекта. (Следует отметить, что системный подход в литературе зачастую называют направлением методологии, методом, общенаучным методом или способом изучения, а его место в методологиях научных исследований однозначно не определено. Предложение о включении системного подхода в этот уровень требует дополнительного обсуждения.).

• Метафизический подход — постижение первоначал, первопричин бытия и логической структуры окружающего мира. Исаак Ньютон считал: "Тяготение объясняет движение планет, но оно не может объяснить, кто заставил их двигаться".

4. Степень общности метаметодологии:

• Всеобщая, или универсальная, метаметодология, применимая для формирования всех методологий исследований.

• Общая метаметодология, применимая для формирования больших групп или родственных методологий исследований.

• Специфическая, или частная, метаметодология, соответствующая особенностям конкретного исследования.

5. Характер (тип) исследования (классы, группы научных методов):

• Эмпирический уровень — добытие и первичная обработка данных о явлениях, связях и процессах.

• Теоретический (мыслительный, умозрительный, "кабинетный") уровень — проникновение в сущность и причинные связи исследуемых процессов.

• Экспертный характер — использование обобщённого прошлого опыта специалистов или свидетелей: анкетный опрос, собеседование и т. п. Может использоваться при отсутствии возможности эмпирического или теоретического исследования или перед их проведением.

В эту же группу могут быть включены и другие типы исследования: исторический, или ретроспективный (обзор литературы и документации по теме исследования, их критический анализ); эвристический (поисковый, "прозрительский") и т. д.

6. Научный метод и процедуры исследования:

• Эмпирические исследования включают наблюдение, эксперимент, физическое моделирование и т. д. Эти исследования могут проводиться в натурных (полевых), полунатурных, созданных (воссозданных, искусственных) условиях и т. д.

• Общелогические методы включают анализ и синтез, индукцию и дедукцию, аналогию и т. д. Они могут использоваться мысленно или реально.

• Общетеоретические методы (мыслительные приёмы, операции) включают абстрагирование и конкретизацию, идеализацию, аналогию и инверсию, аксиоматизацию или формализацию, мысленный эксперимент, математическое и компьютерное моделирование и т. д.

• Процедуры и средства (орудия, инструментарий) проведения исследования, получения, обработки и интерпретации информации:

- проведения исследования;
- получения первичных данных исследования (выявление, описание, измерение, счёт и т. д.);

- обработки, анализа и интерпретации первичных данных (математическая и статистическая обработка, сопоставление, обобщение, систематизация и классификация; формирование конструктов, выводов, практических рекомендаций и т. д.).

7. Результат исследования:

• Эмпирические конструкты — факты, эмпирические количественные и качественные характеристики, их интерпретация и использование (схемы, графики, эмпирические формулы, законы и т. д.). (Пример: законы движения планет математика Иоганна Кеплера, обобщившего результаты многочисленных астрономических наблюдений);

• Теоретические конструкты — системы понятий, гипотезы, теоретические формулы, закономерности, законы, теории, принципы и т. д. (Пример: модель электромагнитного поля в виде дифференциальных уравнений Джеймса Максвелла. Он открыл путём теоретических рассуждений распространение электромагнитного поля в виде ещё тогда не обнаруженных волн.).

• Творческим результатом исследования может быть открытие — новое достижение, установление неизвестных ранее объективно существующих явлений, свойств и закономерностей.

Выводы

Представленный фрагмент метаметодологии исследования автоматизированных систем обобщает основные теоретические и практические методы проведения исследований АС, обработки и использования их результатов.

Фрагмент может служить базисом для формирования методологии конкретного исследования любой АС.

Оригинальными моментами фрагмента являются многоуровневая упорядоченность, а также включение системного подхода в высокий третий уровень метаметодологии.

Все изложенные положения, по мнению автора, являются предварительными. Поэтому автор заранее благодарен за возможные конструктивные замечания и рекомендации.

Литература

1. ГОСТ 34.602-89 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Стадии создания.

2. Митрушкин Е. И. Системотехника. Инженерные основы автоматизированных систем: учеб. пособие. — М.: МИРЭА, 2013. — 200 с.

3. Большой российский энциклопедический словарь. — М.: Большая российская энциклопедия, 2006. — 1888 с.

4. Большая российская энциклопедия. — М.: Большая российская энциклопедия, 2017.

5. Митрушкин Е. И. Методология адресования сообщений в автоматизированных системах управления // Качество и жизнь. 2016. № 3(11). Специальный выпуск. С. 27—34.

**FRAGMENT OF METAMETHODOLOGY OF RESEARCH
OF AUTOMATED SYSTEMS**

E. I. Mitrushkin

Stock Company "Research Institute for Automated Apparatus named after academician
V. S. Semenikhin", Moscow, Russia

*A fragment of the metamethodology of the study of automated systems is proposed —
a generalized hierarchy of known approaches, levels, scientific methods and research results.*

Keywords: research of automated systems, research methodology, research metamethodology, approaches, methods and research results.

Митрушкин Евгений Иванович, профессор, ученый секретарь.
E-mail: 89629785042@mail.ru

Статья поступила в редакцию 5 июля 2021 г.

УДК 519.6, 519.8, 004.94

DOI: 10.52190/2073-2597_2021_4_38

РАЗРАБОТКА МАКЕТА РАСЧЁТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ НАГРУЗОК НА ТРУБОПРОВОДНЫЕ СИСТЕМЫ

С. В. Сумароков; Т. К. Жабоев; Ф. О. Новосельский, канд. эконом. наук; А. С. Саченко
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

Приведены результаты разработки макета расчетного комплекса для решения задач оптимизации нагрузок на трубопроводные системы, предназначенного для апробации подхода по проведению параметрических исследований и решению оптимизационных задач с использованием методов параметрической оптимизации и расчётов на прочность трубопроводов АЭС при действии эксплуатационных и сейсмических нагрузок, выполняемых в программном комплексе dPIPE 5.

Ключевые слова: расчётный комплекс, многокритериальная оптимизация, опорно-подвесная система, трубопроводная система, pSeven, dPIPE.

Структура и основные компоненты макета

Структура макета расчетного комплекса для решения задач оптимизации нагрузок на трубопроводные системы (РКО ТС) строится на базе специализированной программной платформы pSeven, предоставляющей функционал по проведению параметрических исследований и оптимизации, а также выполняющей интеграционную роль для связывания

расчётных систем в единый расчётный комплекс.

Вместе с программной платформой в состав макета РКО ТС входит интерфейс к программному комплексу dPIPE 5, предназначенному для проведения расчетного анализа прочности трубопроводов АЭС под действием эксплуатационных и сейсмических нагрузок [1—3].

Общая структура макета РКО ТС представлена на рис. 1.

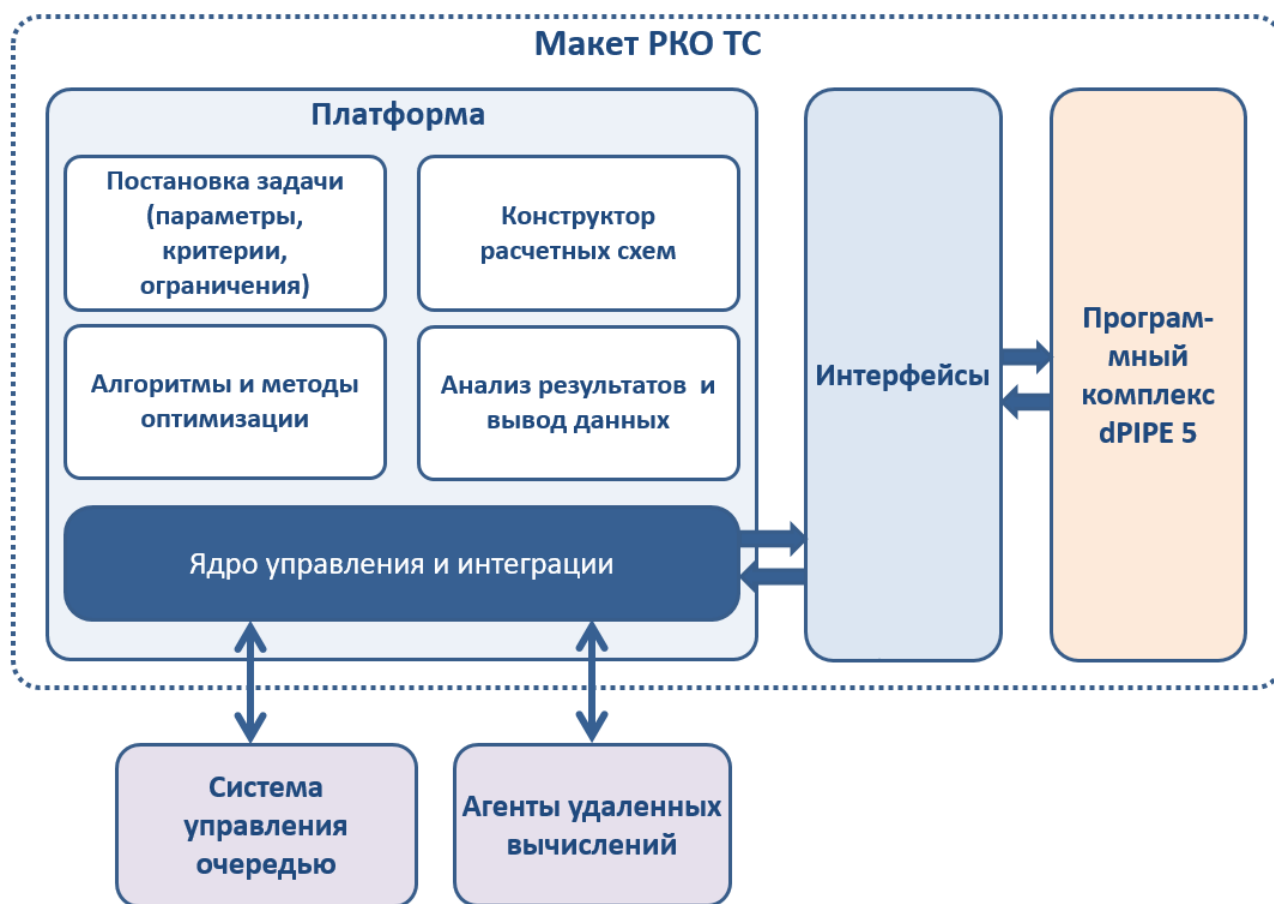


Рис. 1. Общая структура макета РКО ТС

С помощью конструктора расчетных схем программной платформы выстраивается последовательность вычислений с определенным порядком операций и условиями, именуемая расчетной схемой. Построение расчетной схемы выполняется выбором из встроенной библиотеки необходимых блоков и настройкой между ними связей для организации потоков данных. Блоки — это функциональные гибко настраиваемые элементы, в которых выполняются обработка входных данных и формирование выходных данных. Связи служат для маршрутизации данных. При помощи связей осуществляется взаимодействие между блоками, а также задается очередность запуска блоков. Построение расчетной схемы осуществляется созданием сложных правил обработки данных, таких, как циклы, условные ветвления и участки параллельной обработки. Построение простых расчетных схем, как правило, можно реализовать с помощью стандартных блоков программной платформы без написания программного кода. Однако если постановка задачи того требует, в состав расчетной схемы необходимо добавить программируемый блок с практически неограниченным вычислительным функционалом, который необходимо реализовать на поддерживаемой платформой языке Python.

Для проведения оптимизационных расчетов в макете РКО ТС используемая расчетная схема должна содержать оптимизационный цикл. Управление циклом расчета осуществляется блоком параметрической оптимизации (или DSE), являющимся интеллектуальным центром оптимизационного расчета, который, выполняя "умный перебор", определяет оптимальный вариант решения и останавливает расчет.

Блок параметрической оптимизации позволяет в рамках циклического расчета:

- накапливать и анализировать результаты исследования каждого цикла и соответствующие им значения входных и выходных параметров;
- на основании анализа накопленных данных и заданных критериев оптимизации генерировать входные параметры для каждого цикла;
- определять и отслеживать критерии остановки для своевременной остановки расчета.

Важно отметить, что для блока параметрической оптимизации исследуемая функция является "черным ящиком". В ходе расчета блок параметрической оптимизации выполняет вычисления, основываясь только на входных и выходных данных, а также на заданных критериях оптимизации.

Вторым значимым компонентом макета является специализированный программный комплекс dPIPE 5, предназначенный для проведения расчетного анализа прочности

трубопроводов АЭС. Расчеты производятся на действие следующих основных нагрузок и их сочетаний:

- статические нагрузки:
 - собственный вес;
 - внутреннее давление;
 - самокомпенсационные нагрузки, вызываемые температурными расширениями трубопровода, а также тепловыми смещениями присоединяемого оборудования и опор;
 - сосредоточенные в узлах расчетной модели силы и моменты;
 - распределенные по длине элемента моменты от неоднородности распределения температуры по высоте сечения (температурная стратификация);
- динамические нагрузки:
 - поэтажные спектры ответа (сейсмика, удар самолета, взрывная ударная волна);
 - 3-компонентные акселерограммы (сейсмика, удар самолета, взрывная ударная волна);
 - сосредоточенные в узлах расчетной модели силы/моменты, переменные по времени и произвольные по направлению.

Расчеты выполняются с использованием пространственных балочных расчетных моделей в линейно-упругой постановке на статические и динамические воздействия. ПК dPIPE 5 является инженерным средством для расчетов собственных частот, перемещений, ускорений, внутренних силовых факторов. Расчет напряжений и оценка прочности выполняются в соответствии с рекомендациями норм прочности после вычисления внутренних усилий и моментов.

По результатам расчетов определяют параметры напряженно-деформированного состояния трубопроводов (внутренние усилия и напряжения в элементах), ответные кинематические параметры (перемещения, скорости и ускорения), а также нагрузки на опорно-подвесную систему и патрубки присоединенного оборудования. Нормативную оценку прочности трубопроводов производят в соответствии с отечественными и зарубежными нормативными документами, в частности с ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок [4].

Взаимодействие платформы и ПК dPIPE

Принципиальная блок-схема взаимодействия ПК dPIPE и платформы pSeven представлена на рис. 2.

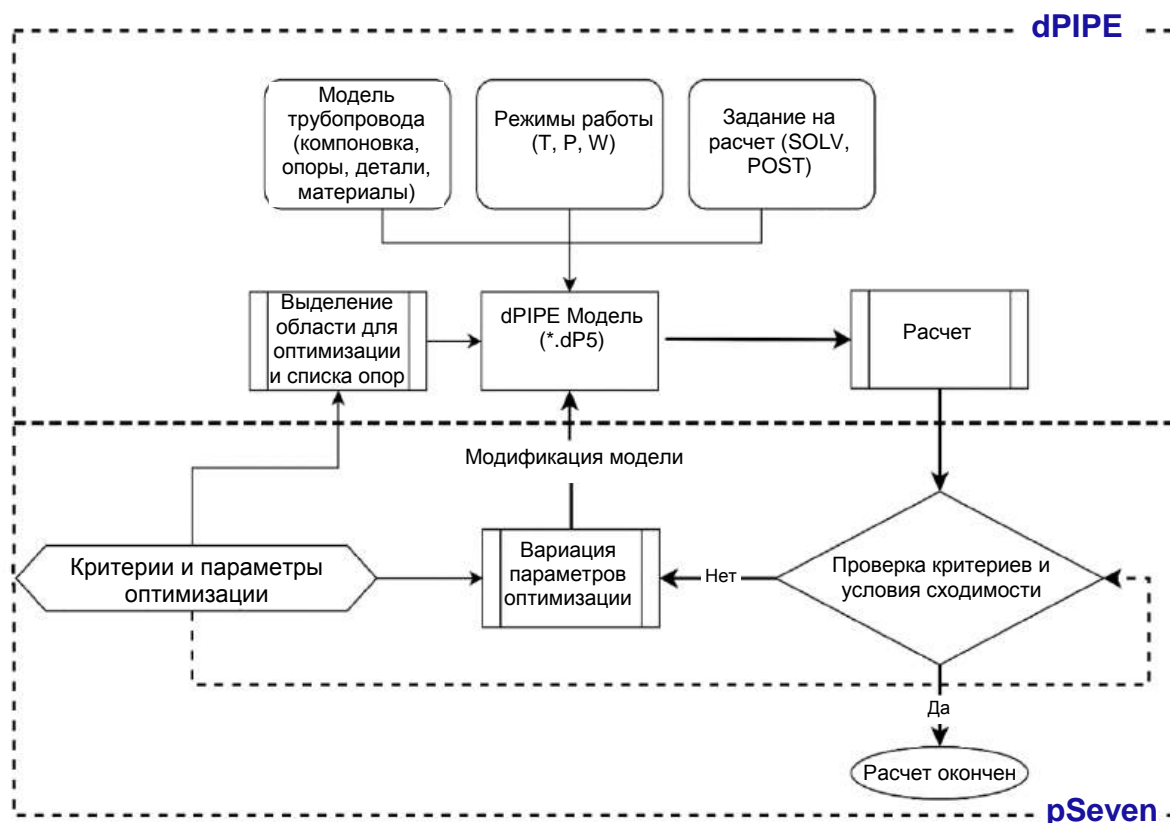


Рис. 2. Блок-схема макета РКО ТС

Исходные данные, необходимые для выполнения расчета прочности трубопровода, содержат три основных блока:

- модель трубопровода — набор данных, включающий информацию о компоновке трубопровода, типах и размерах стандартных деталей, из которых состоит трубопровод, свойствах материалов, расположении и типах опор;
- сведения о режимах работы (температура, давление, среда, данные о нагрузках, включая сейсмику) — информация о режимах эксплуатации трубопровода, а также предусмотренных проектом событиях (аварийные ситуации, землетрясение, падение самолета и т. д.);
- задание на расчет (SOLV) — блок команд, специфицирующий порядок выполнения отдельных расчетов, каждый из которых определяется типом (расчет полной, весовой или сейсмической нагрузки, гидроиспытания и прочее) и постпроцессорной обработкой (POST). Постпроцессорная обработка заключается в вычислении напряжений различных категорий по соответствующим нормам прочности, нагрузок на опоры и присоединенное оборудование, перемещений и ускорений в узлах расчетной модели на основе результатов расчетов.

Перечисленные данные описываются с помощью проблемно-ориентированного языка и формируют расчетную модель dPIPE, хранящуюся в текстовом файле с расширением dr5.

Задачи оптимизации и варьируемые параметры

Постановка задачи оптимизации включает в себя одну или несколько задач, формулируемых проектировщиком трубопровода, например:

- обеспечение соблюдения норм прочности и надежности (обязательная);
- минимизация нагрузок на один или несколько присоединительных фланцев оборудования;
- минимизация суммарной нагрузки на строительную конструкцию;
- увеличение запаса прочности (снижение напряжений);
- минимизация количества опор.

В качестве варьируемых параметров для всех задач могут приниматься:

- положение и число опор (задается посредством признака наличия опоры);
- характеристики опор;
- типы опор (допустимые типы: 6-компонентная опора, пружинная подвеска, направляющая опора, скользящая опора и скользяще-направляющая опора).

Предусмотрены следующие способы варьирования положения опор в расчетной модели:

- за счёт изменения координат узла, к которому она привязана. При этом если в диапазон варьирования попадают соседние узлы или

ветви, варьируемый узел "перепрыгивает" через них, меняя последовательность расположения узлов в исходной модели;

- за счет смены узла, к которому привязана опора. При этом диапазон варьирования ограничен количеством и расположением узлов в расчётной модели.

Критерии и целевые функции

В рамках постановки задачи формируются *критерии оптимизации*, которые должны быть основаны на вычислении целевых функций. Далее представлены четыре типа целевых функций и способы их расчета.

Решение типа RP вычисляет безразмерный показатель, отражающий совокупный "запас прочности" трубопроводной системы. Параметр RP определяется выражением

$$RP = WK_1 \sqrt{\sum_i FS_{1,i}^2} + WK_2 \sqrt{\sum_i FS_{2,i}^2} + \dots + WK_n \sqrt{\sum_i FS_{n,i}^2}, \quad (1)$$

где $FS_{j,i}$ — отношение индивидуально рассчитываемых напряжений i -го элемента трубопроводной системы к их нормативным значениям для j -го типа нагрузок;

WK_j — весовой коэффициент для j -го типа нагрузок.

Индекс j варьируется от 1 до n , где n — число исследуемых типов напряжений трубопровода.

Решение типа RJ вычисляет безразмерный показатель, отражающий суммарное превышение допустимых напряжений всех пролетов, расположенных на исследуемом участке трубопровода. Параметр RJ определяется выражением

$$RJ = WK_1 \sqrt{\sum_i DFS_{1,i}^2} + WK_2 \sqrt{\sum_i DFS_{2,i}^2} + \dots + WK_n \sqrt{\sum_i DFS_{n,i}^2}, \quad (2)$$

где $DFS_{j,i}$ — определяются как $FS_{j,i} - 1$, если значение $FS_{j,i}$ превышает единицу, иначе равно нулю.

Решение типа RS вычисляет безразмерный показатель, отражающий суммарное превышение допустимых напряжений всех пролетов трубопроводной системы или максимальный запас прочности пролета трубопроводной системы. При условии $RS > 0$ параметр RS поэтапно рассчитывается по заданному правилу:

$$RS = \sum_{j,i} DFS_{j,i}. \quad (3)$$

Для случая, когда выражение (3) не превышает ноль,

$$RS = \min \left(\sum_i \frac{FS_{1,i}}{i}, \sum_i \frac{FS_{2,i}}{i}, \dots, \sum_i \frac{FS_{n,i}}{i} \right). \quad (4)$$

Решение типа ES вычисляет безразмерный показатель, отражающий совокупную "эквивалентную стоимость ОПС" трубопровода, выраженную в баллах — эквиваленте стоимости различных типов опор и подвесок. Параметр ES определяется выражением

$$ES = \sum_{i=1}^k N_i st_i, \quad (5)$$

где k — количество типов опор;

N_i — количество опор i -го типа;

st_i — стоимость в баллах i -го типа опор.

Также допускаются решения, направленные на *минимизацию нагрузок на отдельные опоры*. В этом случае исследуют параметр $opora_load$ — максимальное значение по модулю из шести характеристик (FX, FY, FZ, MX, MY, MZ) по нагрузкам для опоры, где FX, FY, FZ — силы, действующие на опору вдоль соответствующих осей; MX, MY, MZ — моменты сил, действующие на опору вокруг осей.

Последний тип решения используют в том числе для расчета минимизации нагрузки на присоединительные фланцы оборудования.

Требования к расчетной модели

Зачастую реализованные в ПК dPIPE расчетные модели содержат множество трубопроводов со своими ОПС, относящимися к разным технологическим системам моделируемого объекта, а также вспомогательные участки, моделирующие оборудование (парогенераторы, баки и прочее). Поэтому в рамках проведения оптимизации предполагается возможность получения решения как всей модели в целом, так и отдельных участков трубопровода с расположенными на них опорами.

Макет РКО ТС позволяет проводить оптимизационные расчеты по предварительно подготовленным в ПК dPIPE расчетным моделям трубопроводов, включая базовую расстановку опор, а также всем необходимым параметрам для выполнения расчета (температура, число циклов, материал, задание на расчет, задание на постпроцессорную обработку данных и т. д.).

При использовании модели dPIPE в рамках макета РКО ТС необходимо выполнять следующие требования:

- если предполагается использовать метод варьирования положения опор привязкой опор к другим узлам, то необходимо разбить трубопровод на достаточное количество дополнительных пролетов, т. е. добавить новые узлы;

- если предполагается оптимизировать не весь, а часть трубопровода расчетной модели, необходимо разбить модель на именованные участки: оптимизационный участок должен иметь уникальный маркер, по которому его будут идентифицировать в процессе расчета; остальные участки также должны иметь уникальные маркеры, по которым они должны быть исключены из выводимых результатов расчета.

Программный интерфейс pSeven-dPIPE

Чтобы обеспечить возможность подключения к платформе pSeven расчетов с использованием ПК dPIPE, разработан соответствующий программный интерфейс. Функционал интерфейса реализован на языке Python 2.7 и базируется на специальной технологии от разработчика платформы pSeven, предназначенной для создания встраиваемых в расчетные схемы pSeven блоков.

На этапе проектирования были сформированы требования к программному интерфейсу к ПК dPIPE, согласно которым он должен позволять:

на этапе настройки интерфейса:

- задавать путь к исходному файлу расчетной модели;
- формировать дерево параметров проекта на основе исходной расчетной модели (варьируемые параметры опор, целевые функции, опции задания на расчет);
- выбирать параметры в дереве проекта и автоматически создавать порты блока интерфейса для выбранных параметров;
- обеспечивать возможность выбора способа изменения положения опор;
- в качестве варьируемых параметров для опоры задавать: положение, жесткость, наличие (да/нет), тип (в соответствии с ограничениями);

на этапе выполнения расчёта:

- получать значения параметров от платформы через соответствующие им порты блока интерфейса;
- формировать файл расчетной модели для текущей итерации расчета в специально созданной папке. Формирование файла расчетной модели должно осуществляться копированием исходной модели и ее изменением;
- запускать на выполнение расчет ПК dPIPE через командную строку, передавая путь к расчетной модели;
- отслеживать выполнение расчета;
- обрабатывать результаты расчета, включая вычисление целевых параметров RP, RJ, RS, SR и максимальной нагрузки на опоры.

Таким образом, в среде pSeven программный интерфейс к ПК dPIPE реализуется как пользо-

вательский блок (библиотеки блоков). Для взаимодействия с платформой pSeven пользовательский блок реализует две базовые функции: `tree_build` и `step`.

Функция `tree_build` вызывается системой pSeven на этапе настройки расчетной схемы и в качестве аргумента получает путь к файлу, выбранному пользователем через графический интерфейс. Как правило, это файл с исходной расчетной моделью. Данная функция отвечает за построение на основе анализа исходной расчетной модели дерева параметров, которые могут или должны быть задействованы в расчете.

Функция `step` вызывается платформой pSeven на каждой итерации расчёта. В качестве основных аргументов функции выступают наборы с входными и выходными данными, а также путь к исходной модели, выбранной на этапе настройки блока. Эта функция последовательно выполняет следующие действия:

- считывает спецификацию задания — какие изменения нужно внести в базовую модель трубопровода перед запуском dPIPE и некоторые другие настройки;
- производит изменение базовой модели трубопровода;
- создаёт необходимые файлы и папки для запуска расчёта dPIPE для изменённой модели;
- запускает расчётный код dPIPE на исполнение;
- разбирает выходные файлы dPIPE с результатами расчёта;
- вычисляет целевые функции;
- возвращает данные в систему pSeven.

Структурная диаграмма пользовательского блока dPIPE представлена на рис. 3.

Апробация макета

В целях проверки корректности предложенного подхода в целом и технических решений, реализованных в макете, была проведена апробация макета на примере решения тестовых оптимизационных задач.

В рамках апробации макета в качестве исходных данных для первого тестового расчета был рассмотрен короткий участок трубопроводной системы, включающий трубопровод, три скользящие опоры и фланец присоединительного оборудования. Топологию исследуемого участка формировались на основе 9 узлов расчетной модели, которые задавали направление и длину трубопровода, а также определяли расположение элементов опорно-подвесной системы. Отношение максимального расчетного напряжения к допустимому (FS) для пролетов трубопровода между узлами 5 и 6, а также между узлами 6 и 7 превысило единицу (рис. 4), из чего следовало, что трубопроводная система не удовлетворяла нормам прочности и надежности ПНАЭ.

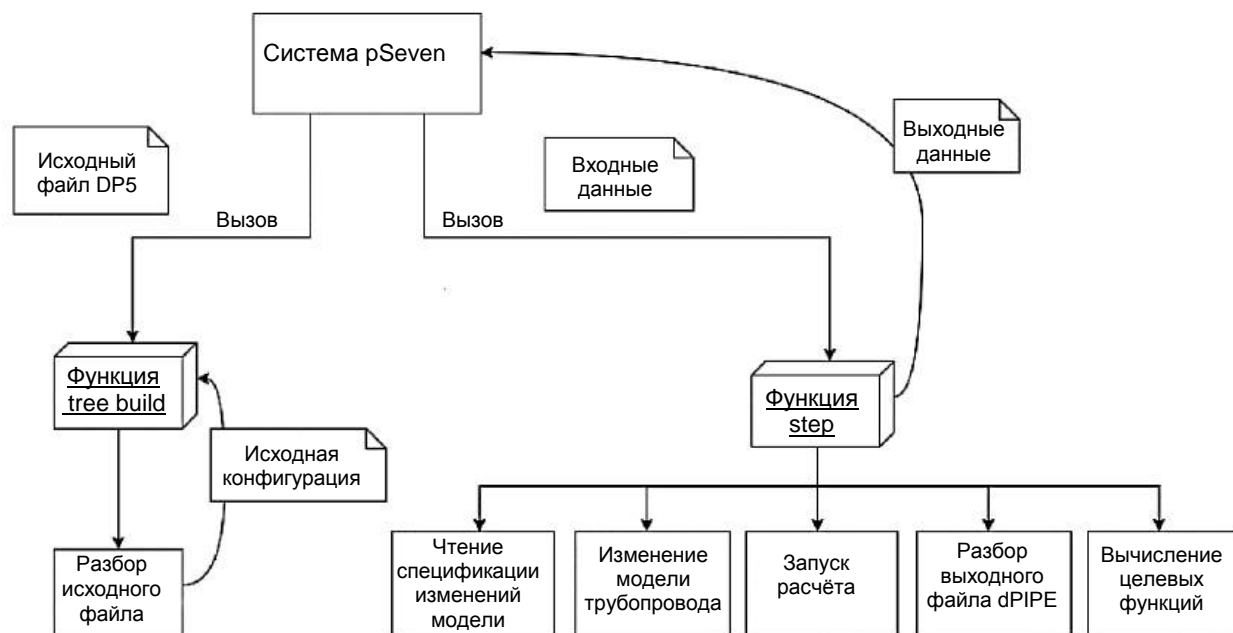


Рис. 3. Структурная диаграмма пользовательского блока dPIPE

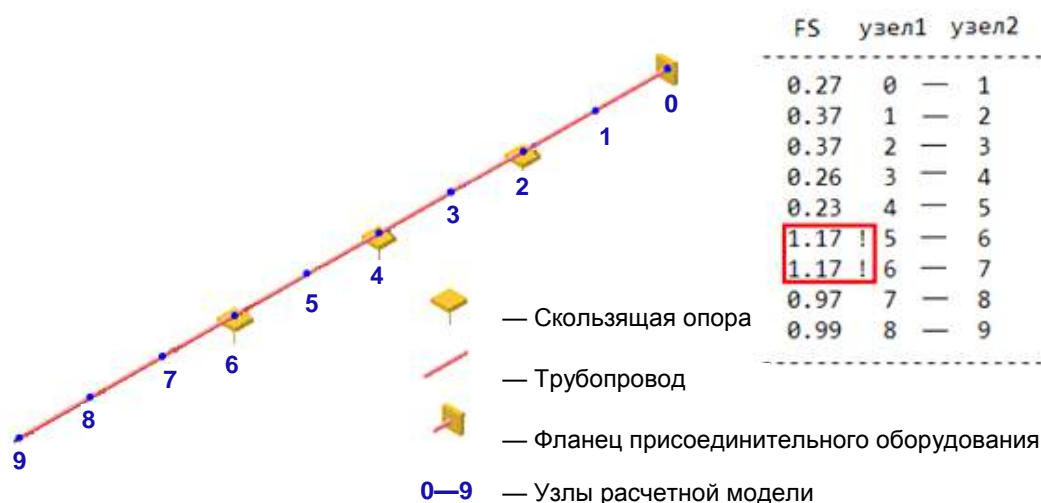


Рис. 4. Исследуемый участок трубопроводной системы

Целью оптимизационного расчета являлось определение оптимальной конфигурации ОПС, удовлетворяющей условиям прочности и надежности, а также обеспечивающей максимальный запас прочности трубопровода. Постановка задачи с технической стороны: определить конфигурацию ОПС, обеспечивающую значение целевой функции RJ, равное нулю, и минимальное значение целевой функции RP (обратное суммарному запасу прочности).

Варьировать в ходе расчета допускалось положение трех узлов, к которым привязаны скользящие опоры, в рамках двух соседних узлов по направлению и против направления следования трубопровода. Таким образом, положение узла 2 (см. рис. 4) варьировалось в рамках участка трубопровода между узлами 0 и 4, по-

ложение узла 4 — между узлами 2 и 6, а узла 6 — между узлами 4 и 8.

Согласно результатам проведенного оптимизационного расчета узлы, к которым привязаны опоры, в той или иной степени сместились ближе к "проблемной области" между узлами 5—7 и относительно равномерно распределились по исследуемому участку трубопровода, тем самым обеспечив соблюдение условий прочности и надежности, а также максимально возможный общий запас прочности трубопровода. Новое расположение опор и смещение их относительно исходного положения, а также отношение максимальных расчетных напряжений к допустимым FS для пролетов трубопровода для оптимальной конфигурации ОПС представлены на рис. 5.

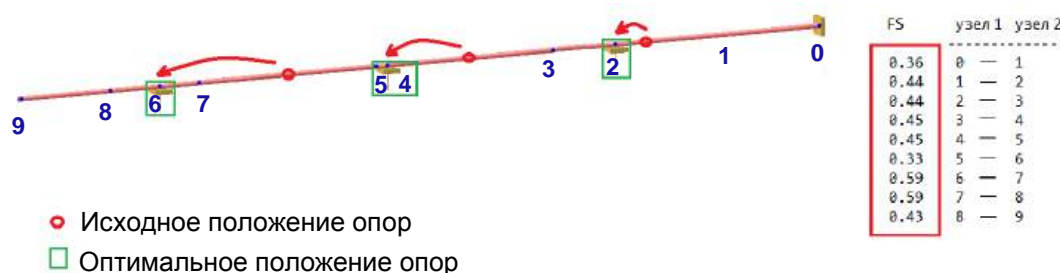


Рис. 5. Оптимальная конфигурация ОПС исследуемого участка ТС

Целью следующего расчета в рамках апробации макета РКО ТС являлось определение конфигурации ОПС, удовлетворяющей нормам прочности и надежности, а также обеспечивающей минимальную эквивалентную стоимость ОПС, которая определяется исходя из заданных эквивалентов стоимости для разных типов опор. Постановка задачи с технической стороны — определить конфигурацию ОПС, обеспечивающую значение целевой функции RJ, равное нулю, и минимальное значение целевой функции ES (общая эквивалентная стоимость ОПС).

В качестве исходных данных для этого тестового расчета была рассмотрена трубопроводная система (рис. 6), включающая трубопровод, восемь скользящих опор и два фланца присоединительного оборудования.

единительного оборудования. Рассматриваемая ТС обладала излишним запасом прочности, что обеспечивало возможность значительного снижения общей эквивалентной стоимости ОПС за счет удаления и/или изменения типа опор.

По результатам проведенного оптимизационного расчета были удалены четыре избыточные опоры, а тип одной из оставшихся опор был изменен со скользящей на скользящую-направляющую (рис. 7), что обеспечило снижение общей эквивалентной стоимости ТС на 37 % (при заданных стоимостных эквивалентах для разных типов опор) в сравнении с исходной конфигурацией исследуемой трубопроводной системы.

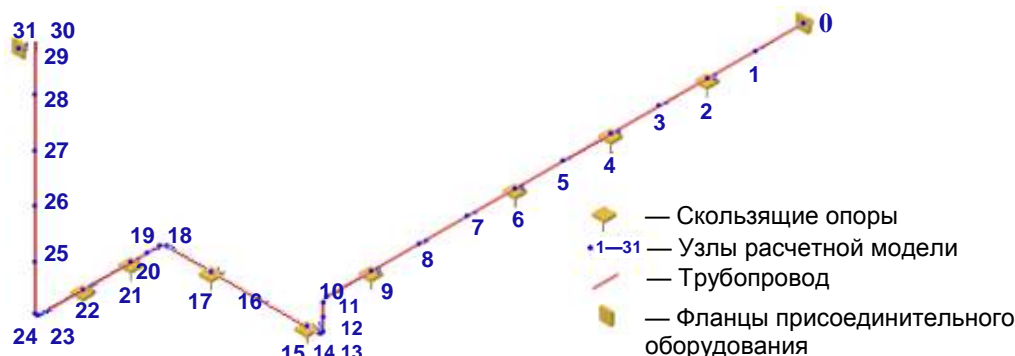


Рис. 6. Исследуемая трубопроводная система

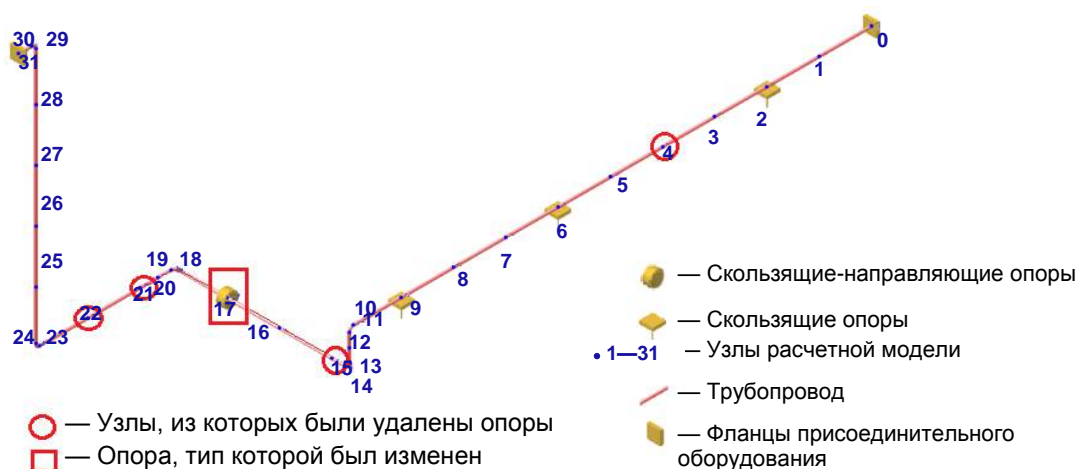


Рис. 7. Оптимальная конфигурация ОПС исследуемой ТС

Заключение

Разработан макет расчётного комплекса для решения задач оптимизации нагрузок на трубопроводные системы, предназначенный для апробации подхода по проведению параметрических исследований и решению оптимизационных задач с использованием методов параметрической оптимизации и расчётов на прочность трубопроводов АЭС при действии эксплуатационных и сейсмических нагрузок, выполняемых в ПК dPIPE 5.

Реализованный в составе макета программный интерфейс к ПК dPIPE позволяет варьировать в расчётной модели такие параметры ОПС трубопровода, как количество, жесткость, тип, положение опор, которые задаются исследователем в определенных границах ветви трубопровода.

Апробация макета на примере решения тестовых оптимизационных задач подтвердила работоспособность макета, а также корректность выбранного подхода и технических реше-

ний, положенных в основу реализации макета РКО ТС.

В рамках дальнейших работ предполагается проведение испытаний разработанного макета и развитие до полнофункциональной версии расчётного комплекса для решения задач оптимизации нагрузок на трубопроводные системы.

Литература

1. pSeven: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.datadadvance.net/ru/product/pseven/> (дата обращения: 14.09.2020).
2. Программный комплекс dPIPE 5: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dpipe.ru/> (дата обращения: 01.10.2020).
3. Аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин N 265 от 20.10.2019: [Электронный ресурс]. URL: https://www.dpipe.ru/ru/dpipe-documents_ru/download/16-dpdocs_ru/209-ar_ps_dpipe5_20-10-2019.html (дата обращения: 01.10.2020).
4. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоиздат, 1989. — 525 с.

DEVELOPMENT THE PROTOTYPE OF CALCULATION COMPLEX FOR OPTIMIZATION THE LOADS ON PIPING SYSTEMS

S. V. Sumarokov, T. K. Zhaboev, Ph. O. Novoselsky, A. S. Sachenko
Nuclear Safety Institute of the RAS, Moscow, Russia

The article presents the results of the development prototype of calculation complex for optimization the loads on piping systems, intended for approbation of an approach for parametric studies and solving optimization problems using of an parametric optimization methods and strength calculations of NPP pipelines under the action of operational and seismic loads, calculating in dPIPE 5.

Keywords: calculation complex, multi-criteria optimization, support-suspension system, piping system, pSeven, dPIPE.

Сумароков Сергей Вячеславович, заведующий отделом.

E-mail: sumarokov@ibrae.ac.ru

Жабоев Тембулат Караканович, заведующий лабораторией.

E-mail: tembulat@ibrae.ac.ru

Новосельский Филипп Олегович, заместитель заведующего отделом.

E-mail: pn@ibrae.ac.ru

Саченко Алексей Сергеевич, ведущий инженер.

E-mail: sachenko.a@ibrae.ac.ru

Статья поступила в редакцию 21 января 2021 г.

УДК 004.056.55

DOI: 10.52190/2073-2597_2021_4_46

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПЛАТФОРМЫ СМАРТ-КОНТРАКТОВ КАК НОВЫЙ ВИТОК РАЗВИТИЯ ГЛОБАЛЬНОГО РЫНКА ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. А. Кривоногов; К. В. Пителинский, канд. техн. наук; Н. В. Федоров, канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Россия

Обсуждаются тенденции развития мирового рынка блокчейн-технологий и смарт-контрактов. Проведен сравнительный анализ наиболее распространенных и перспективных платформ для разработки и алгоритмической реализации смарт-контрактов. Раскрыты ключевые особенности работы каждой из блокчейн-платформ в период развития цифровых технологий (вызванного появлением новых приложений и финансовых сервисов), а также в условиях пандемии COVID-19.

Ключевые слова: технология блокчейн, токен, алгоритм консенсуса, модель данных, язык программирования, полнота по Тьюрингу, децентрализованное приложение, виртуальная машина, финансовые технологии.

В эпоху цифровизации проекты на основе технологии блокчейн заняли значительную нишу на рынке финансовых продуктов и услуг. Банки и финансовые организации должны осознавать важность технологии блокчейн, которая позволяет значительно повысить эффективность реализации бизнес-процессов и обеспечить их непрерывность, убрать лишних посредников, а также гарантированно защитить информационные потоки.

Мировая пандемия COVID-19 заставила пересмотреть отношения многих работодателей и организаций к своей деятельности, особенно из-за перехода значительной части сотрудников на удаленную работу и из-за затруднения личного общения участников сделок между собой.

Отмеченные практические проблемы, по мнению авторов, может решить широкое применение технологий блокчейн в рамках исполнения смарт-контрактов на платформе мобильных устройств.

Предполагается, что блокчейн в скором времени будет использоваться в различных банковских и финансовых сервисах, прежде всего из-за таких факторов, как высокая совместимость с экосистемой индустрии финансовых сервисов, экспоненциальный рост криптовалют и проектов ICO, а также быстрые транзакции и снижение общей стоимости владения, поскольку именно отрасли финансовых технологий допускают системную, а не очаговую автоматизацию, с применением инновационных технологий [1].

Согласно результатам исследований одного известного интернет-портала в области блокчейна [2] ожидается, что размер глобального рынка блокчейн-технологий вырастет с 3 млрд долл. в 2021 г. до 39,7 млрд долл. к 2025 г. при впечатляющем среднегодовом темпе роста в 67,3 % в течение 2021—2025 гг. Тенденции развития рынка блокчейн-технологий в ближайшие годы представлены на рис. 1.

Несомненно, такую популярность блокчейн-проекты получили в том числе и за счет приме-

нения технологии смарт-контрактов. Смарт-контракты, особенно в последние годы, представляют собой новую "золотую лихорадку" в разработке программного обеспечения, когда любая компания может мгновенно добиться успеха.

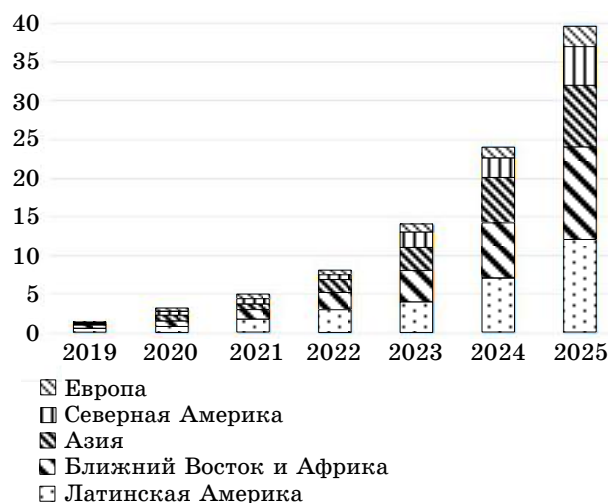


Рис. 1. Тенденция развития рынка блокчейн-технологий [2]

Смарт-контракты — цифровые контракты, которые позволяют двум или более сторонам информационного обмена заключать некое соглашение. Основное преимущество смарт-контрактов в том, что они не требуют контроля их выполнения со стороны третьих лиц, что прежде всего дает очевидные преимущества в цене и скорости [3].

Смарт-контракты являются поистине революционным инструментом, и у этой технологии есть потенциал для децентрализации многих процессов управления в разных сферах человеческой деятельности. В частности, смарт-контракты позволяют резко улучшить существующие бизнес-процессы, при этом не созда-

вая прямой угрозы для задействованных в них сторон [3].

Вследствие распространенности этих двух технологий за короткий промежуток времени появилось большое количество блокчейн-платформ, которые поддерживают технологию смарт-контрактов. Каждая из платформ предназначена для функционирования в той или иной предметной области и позволяет решать широкий спектр задач. Некоторые из платформ являются эксклюзивными, что предполагает наличие некоторого централизованного управления. Данный тип блокчейн-платформ широко применим в проектах с коммерческой составляющей. В свою очередь, инклюзивный тип блокчейна подразумевает полностью децентрализованную среду с отсутствием единого центра принятия решений. При этом инклюзивный блокчейн подвержен большому количеству критических атак со стороны злоумышленников. Например, одной из самых распространенных атак до сих пор считается атака 51 %. Атака заключается в реализации деструктивных воздействий со стороны злоумышленника на блокчейн-сеть за счет контроля 51 % вычислительных ресурсов сети в целях создания нового форка и последующей модификации транзакций [1, 4].

Наиболее распространены такие блокчейн-платформы, как Ethereum, Rootstock, Stellar, Waves, Tezos. Для общего понимания технологии блокчейн, а также для того, чтобы принять верное решение относительно выбора платформы для активного использования и развертывания децентрализованных пользовательских приложений (DApp), следует рассмотреть каждую из этих платформ, выделить их ключевые аспекты, а также проанализировать преимущества и недостатки.

Ethereum

Ethereum является ведущей платформой для смарт-контрактов. Впервые она была запущена в июле 2015 года. Разработчики выбирают Ethereum для создания новых приложений, связанных с финансовыми сервисами, децентрализованными рынками, играми, кошельками с криптовалютой.

Платформа Ethereum организована в соответствии с моделью данных на основе учетных записей (account-based), в которой каждый участник идентифицируется своим цифровым кошельком. Подобно Bitcoin, Ethereum использует алгоритм консенсуса Proof-of-Work (доказательство работы), который требует значительных ресурсов для вычисления блоков. Для того чтобы компенсировать затраты на решение трудных задач, выполняемых майнерами, на платформе реализована внутренняя валюта — эфир (ETH). При этом для оплаты транзакций в сети Ethereum применяется газ — денонимированная единица эфира. Пользователи могут

платить разное количество газа, чтобы эти транзакции были подтверждены в тот или иной промежуток времени (большее количество газа приводит к более быстрому подтверждению транзакции) [5].

В качестве основного языка алгоритмической реализации смарт-контрактов в Ethereum используется высокоуровневый язык программирования (ЯП) Solidity. Этот ЯП является полным по Тьюрингу, т. е. в смарт-контракте может быть заложен любой функционал с любыми условиями, позволяющий решить любые вычисляемые задачи. Синтаксис Solidity аналогичен JavaScript, где результирующий код, связанный со смарт-контрактом, компилируется в байт-код, а затем запускается в виртуальной машине EVM для выполнения функциональных возможностей смарт-контракта. ЯП Solidity поддерживает наследование, библиотеки, имеет статическую типизацию и сложные, определяемые пользователем типы данных функций. Среди остальных ЯП, которые также используются на платформе Ethereum, можно выделить Vyper, Serpent, Low-level Lisp-like Language (LLL) и Mutan [5, 6].

За прошедшие годы Ethereum пережил несколько значительных событий, наиболее известным из которых является инцидент с децентрализованной автономной организацией (DAO), который произошел в 2016 г. Тогда злоумышленнику удалось воспользоваться уязвимостью повторного входа (Reentrancy) в смарт-контракте и украсть цифровые активы на сумму 50 млн долл. Последствия инцидента побудили активные дискуссии в сообществе Ethereum: часть пользователей поддерживала откат блокчейн-сети для возврата утраченных средств, в то время как другая часть утверждала, что код не должен быть изменен [7]. По результатам обсуждения был произведен "спорный" хардфорк для отмены взлома и возврата цифровых активов инвесторам. В результате разделения цепочки блоков на две ветки был сформирован блокчейн Ethereum Classic (рис. 2).



Рис. 2. Хардфорк Ethereum (разработано авторами)

Самая большая проблема Ethereum — отсутствие масштабируемости. Несмотря на то что данная платформа является одной из наиболее часто используемых, она серьезно страдает от перегрузки сети. Это можно объяснить тем, что из-за сильно децентрализованного подхода к разработке ядра обновления приходят доста-

точно медленно и часто сопровождаются задержками.

С помощью блокчейн-платформы Ethereum можно децентрализовать любой централизованный сервис. Среди всех представленных в этой статье платформ Ethereum имеет самую большую рыночную капитализацию, при этом вкладывая значительные средства в развитие и улучшение работы смарт-контрактов.

Rootstock

Блокчейн-платформа Rootstock (или, как ее часто называют, RSK) была основана в 2015 г., а запуск ее основной сети произошел в январе 2018 г. RSK работает поверх блокчейн-сети Bitcoin, при этом поддерживая более быстрое выполнение транзакций. Платформа RSK совместима и с Ethereum, в результате чего также может применяться ЯП Solidity для разработки смарт-контрактов. Смарт-контракты RSK тоже являются полными по Тьюрингу. Для преобразования в байт-код и запуска смарт-контрактов на целевой платформе используется виртуальная машина RVM. Платформа позволяет пользователям создавать и запускать смарт-контракты поверх блокчейна Bitcoin [8].

Модель данных RSK, так же как и Ethereum, реализована на основе учетных записей (account-based). Для блокчейн-платформы RSK разработан собственный механизм консенсуса на основе алгоритма Proof-of-Work с облегченной схемой реализации, которая позволяет снизить накладные расходы. Платформа используется в первую очередь для поддержки приложений цифровой валюты [9].

RSK использует технологию сайдчейн — метод, который применяется для разделения сети блокчейн, где пользователь может отправлять свои цифровые активы в дополнительную цепочку блоков, а при необходимости — передавать их обратно в основную сеть. Это позволяет внедрять инновационные технологии, не беспокоясь о том, что вложенные в них средства не оправдают себя. В связи с тем что RSK является сайдчейном, он не может выпускать новую валюту или токен. Вместо этого для оплаты транзакций на платформе применяется двусторонняя связка между собственным токеном Rootstock (называемым RTC) и Bitcoin [9].

Одним из наиболее заметных аспектов блокчейн-платформы RSK является ее ориентация на безопасность. На платформе реализована система денежных вознаграждений, которая мотивирует разработчиков и специалистов по информационной безопасности распознавать и находить уязвимости. Такое решение используется для постоянного улучшения общей безопасности блокчейн-платформы. Помимо этого RSK предлагает масштабируемость, а также быструю оплату и малую сетевую задержку.

Stellar

Stellar является специализированной блокчейн-платформой для создания безопасных и быстрых финтех-приложений, токенов и цифровых активов. Платформа была основана еще в 2014 г., что сделало ее одним из старейших представителей платформ смарт-контрактов. Блокчейн-платформа Stellar активно поддерживается сообществом Stellar Development Foundation [10].

Stellar может поддерживать множество ЯП, таких, как Python, JavaScript, Golang и PHP. Однако смарт-контракты Stellar не являются полными по Тьюрингу, а значит, могут выполнять только простые функции для базового приложения (т. е. имеют ограниченный функционал). Stellar выполняет программный код поверх контейнеров Docker, что снижает накладные расходы. Например, стоимость выполнения одной транзакции в Stellar составляет около 0,0000002 долл. Время выполнения одной транзакции в сети составляет около 5 с по сравнению с несколькими минутами в блокчейне Ethereum [11].

Как и Ethereum, Stellar использует модель на основе учетных записей (account-based) в качестве модели данных. В рамках блокчейн-платформы Stellar реализован собственный алгоритм консенсуса Stellar Consensus Protocol (SCP), который является открытым протоколом византийского соглашения, устойчивым к атакам Сивиллы. SCP гарантирует безопасность сети от нерационального поведения и требует небольших вычислительных ресурсов от узлов для достижения консенсуса [9].

Одним из основных отличий Stellar от других блокчейн-платформ (например, Ethereum) является отсутствие встроенного ЯП смарт-контрактов или виртуальной машины для преобразования и выполнения кода. Вместо этого смарт-контракт выражается в виде композиций транзакций, которые связываются между собой и выполняются с использованием различных ограничений (множественные подписи, пакетирование, последовательность и временные рамки). Главным недостатком платформы является отсутствие возможности создания сложных смарт-контрактов (которыми являются, например, DApp). Несмотря на это, смарт-контракты Stellar получили широкое распространение при осуществлении первичного размещения монет (ICO) [10, 12].

Блокчейн-платформа Stellar является наиболее экономичным и простым решением для разработки базовых приложений и токенов, используя основные ЯП. Платформа может применяться для облегчения трансграничных денежных переводов. Например, в 2019 г. компания IBM запустила глобальную платежную систему World Wire, основанную на протоколе Stellar, которая позволяет обрабатывать трансграничные платежи в режиме реального време-

ни. Для совершения перевода финансовые институты договариваются использовать стейблкоин или цифровую валюту центрального банка, который будет служить "мостом" между двумя фиатными валютами [9].

Waves

Блокчейн-платформа Waves была запущена в июне 2016 года российским предпринимателем Александром Ивановым. Ориентиром при создании проекта послужила другая распределенная криптографическая платформа — NXT. Waves является платформой с открытым исходным кодом, которая направлена на устранение многих существующих барьеров за счет достаточной скорости и масштабируемости. Waves позиционирует себя как платформу, которая упрощает проведение операций с токенами и подходит для проведения ICO. Создание собственных токенов на платформе занимает несколько минут, не требуя от пользователя специальных технических навыков и знаний [13].

Waves реализует эксклюзивную модель блокчейна, доступ к которому возможен только участникам, которые были предварительно авторизованы администратором системы. На платформе также реализована ролевая модель, позволяющая наделять участников теми или иными дополнительными возможностями (право на отправку транзакций в блокчейн-сеть, право на формирование блоков, право на выпуск токенов и т. д.).

Данная платформа поддерживает три алгоритма консенсуса: Proof-of-Authority (доказательство полномочий), Leased Proof-of-Stake (арендованное доказательство доли владения) и Crash Fault Tolerant (один из типов византийских протоколов, который обладает повышенной отказоустойчивостью). Все представленные протоколы консенсуса гарантируют корректность добавляемых в блокчейн данных, а децентрализованная система позволяет обеспечивать независимый доступ к данным. Waves, так же как и большинство других представленных в обзоре платформ, имеет модель на основе учетных записей (account-based), вследствие чего каждая транзакция создается от имени учетной записи, токены принадлежат определенным учетным записям и все данные связаны с конкретным пользователем [13].

На блокчейн-платформе Waves используются полные по Тьюрингу смарт-контракты, позволяющие реализовать практически любую логику, которая заложена в программный код. Для разработки смарт-контракта можно применить любой доступный ЯП. Каждый смарт-контракт запускается в Docker-контейнере для изоляции его работы и управления ресурсами исполняемого смарт-контракта. Смарт-контракт может создавать любой участник сети. Для этого лишь необходимо зарегистрироваться в главной сети через клиентский интерфейс. В конце июня

2019 г. Waves также анонсировала запуск в основной сети собственного ЯП RIDE, который позволит создавать смарт-контракты и DApp. Данный ЯП отличается своей легкостью в освоении и эксплуатации, что позволит разработчикам избегать ошибок во время программирования [11].

Несомненным преимуществом данной платформы является поддержка сертифицированной криптографии ГОСТ. Например, операция хеширования на платформе Waves выполняется функцией "Стрибог" по криптографическому алгоритму ГОСТ 34.11-2012. В качестве электронной подписи может быть взят в том числе алгоритм ГОСТ 34.10-2012, а для симметричного шифрования данных (помимо AES) — алгоритм ГОСТ 34.12-2015 [5].

Waves является очень перспективной блокчейн-платформой, которая позволяет максимально упростить работу рядового пользователя с блокчейном и краудфандингом (причем крупные игроки российского рынка, например Сбербанк, уже активно проводят пилотирование бизнес-кейсов). Команда Waves планирует и дальше развивать свою платформу смарт-контрактов, чтобы впоследствии обеспечить ее активное внедрение в различные финтех-компании.

Tezos

Tezos является децентрализованной блокчейн-сетью с открытым исходным кодом, которая позволяет выполнять одноранговые транзакции и развертывать смарт-контракты. Блокчейн-платформа была запущена в 2017 г. после привлечения рекордной суммы инвестиций в 232 млн долл. Проект был создан в качестве альтернативы блокчейн-платформе Ethereum. Основатели Tezos Кэтли и Артур Брайтман позиционируют ее как децентрализованную платформу нового поколения. Она имеет модульную архитектуру и формальный механизм обновления, что позволяет значительно упростить формальную верификацию [14].

Для достижения консенсуса блокчейн-платформа использует протокол Liquid Proof-of-Stake. Особенность данного протокола заключается в том, что держатели токенов могут делегировать свои права на проверку другим держателям (валидаторам) без передачи права собственности на свои токены (делегирование всей учетной записи пользователя) [9]. Дополнительно Tezos имеет контрольные точки — хеши состояния блокчейна, которые хранятся вне сети (контрольные точки считываются узлами для проверки текущего состояния блокчейна в заданный момент времени). Контрольные точки позволяют ограничивать тот промежуток времени, в который могут происходить атаки на блокчейн-сеть, однако этот механизм привносит и некоторую централизацию.

Для большей масштабируемости сети команда разработчиков Tezos планирует внедрить

протокол доказательства с нулевым разглашением криптовалюты Zcash с небольшими изменениями. Такой метод позволит разделить выполнение смарт-контрактов и его проверку узлами консенсуса. Выполнение смарт-контрактов будет осуществляться на специализированных серверах, а узлы консенсуса будут подтверждать действительность смарт-контрактов без прямого доступа к ним, исключительно на основе предоставленных им доказательств. Протокол дает меньшую нагрузку на узлы консенсуса, сохраняя при этом свойство децентрализации смарт-контрактов [1, 14].

В качестве ЯП для разработки смарт-контрактов создан собственный уникальный низкоуровневый ЯП Michelson, который облегчает формальную верификацию (обычно используемую в критически важных областях), тем самым обеспечивая должную надежность и безопасность смарт-контракта. Michelson является полным по Тьюрингу ЯП смарт-контрактов. Он статически типизирован, чисто функционален и предлагает таблицы, наборы, списки и криптографические примитивы [12].

Формальная верификация, в свою очередь, предоставляет определенные математические гарантии того, что смарт-контракт выполняет те условия, которые были заложены в него разработчиком. Обычно сюда входит создание абстрактной математической модели смарт-контракта, эквивалентность которой может быть подтверждена предоставленным спецификациям. Подобным образом можно установить эквивалентность смарт-контракта и спецификаций. В том случае, когда спецификации написаны должным образом, смарт-контракт также будет точным. Этот механизм позволяет устранить многие распространенные формы ошибок в коде смарт-контракта [7].

Tezos является достаточно молодой блокчейн-платформой со множеством перспектив для разработки смарт-контрактов. С каждым днем Tezos все больше сосредотачивается на рынке токенизации, а именно на рынке токенов безопасности, благодаря чему уже было реализовано несколько крупных сделок и партнерств, в том числе с Центральным банком Бразилии, а также с компаниями Dealbox и Vertalo.

Сравнительный анализ блокчейн-платформ

По результатам рассмотрения особенностей каждой из блокчейн-платформ осуществим их сравнение по ключевым аспектам в целях выявления оптимального варианта применения в качестве платформы для разработки смарт-контрактов. При этом используем следующие базовые параметры сравнения блокчейн-платформ.

Тип блокчейн-платформы. Существуют децентрализованные (инклюзивные) и централи-

зованные (эксклюзивные) платформы смарт-контрактов. В инклюзивных платформах каждый участник наделяется равными правами и может произвольно подключаться к сети, тем самым обеспечивая полную децентрализацию. Эксклюзивные платформы предоставляют доступ только заранее аутентифицированным пользователям, из-за чего возникает некая централизация.

Используемая модель данных. В блокчейн-сети транзакции выполняются в соответствии с той или иной моделью данных. Различают две основные модели данных в блокчейн-платформах: UTXO (вывод неизрасходованных транзакций) и account-based (модель на основе учетных записей). В модели UTXO транзакция состоит из входов и выходов, а все монеты хранятся в виде списка [6]. Account-based-блокчейны устроены по аналогии с банковским счетом и оперируют только суммой на счете пользователя и суммой перевода.

Валюта платформы. Внутренняя криптовалюта, которая выпускается в рамках блокчейн-платформы и обеспечивает проведение расчетов и платежей.

Алгоритм и/или протокол консенсуса. Механизм обеспечения того, чтобы все участники блокчейн-сети соблюдали согласованные правила.

Количество транзакций в секунду (TPS). Число транзакций, которые сеть способна обрабатывать в любой момент времени.

ЯП смарт-контрактов. Существует большое количество ЯП для разработки смарт-контрактов. В платформе смарт-контрактов может быть как собственный ЯП, так и общеизвестные (Java, C++, Python и т. д.).

Полнота по Тьюрингу. Бывают как полные, так и неполные по Тьюрингу смарт-контракты. Полный по Тьюрингу смарт-контракт позволяет реализовать практически любой функционал, однако такая реализация также может привести и к потенциальным ошибкам программного обеспечения. Неполные по Тьюрингу смарт-контракты обычно выполняют ограниченный функционал для определенных команд и не позволяют реализовать циклы или собственные алгоритмы [11].

Преимущества платформы смарт-контрактов. Определяются основные особенности и преимущества от использования той или иной платформы смарт-контрактов.

Недостатки платформы смарт-контрактов. Выделяются технологические барьеры, ограничения и недостатки, которыми обладает платформа смарт-контрактов.

Целевое назначение платформы. Данная характеристика определяет, в какой области и для реализации каких приложений применяется платформа смарт-контрактов.

Сравнительный анализ перспективных платформ смарт-контрактов приведен в таблице.

Сравнительный анализ платформ смарт-контрактов

	Ethereum	Rootstock	Stellar	Waves	Tezos
Тип блокчейн-платформы	Инклюзивный	Эксклюзивный	Эксклюзивный	Эксклюзивный	Инклюзивный
Используемая модель данных	Account-based	Account-based	Account-based	Account-based	Account-based
Валюта платформы	ETH	RBTC	XLM	WAVES	XTZ
Алгоритм и/или протокол консенсуса	Proof-of-Work, Proof-of-Stake	Собственный механизм на основе Proof-of-Work	Stellar Consensus Protocol (SCP)	Proof-of-Authority, Leased Proof-of-Stake и Crash Fault Tolerant	Liquid Proof-of-Stake
Количество транзакций в секунду (TPS)	25	300	3000	500	40
Полнота по Тьюрингу	Полный/неполный	Полный	Неполный	Неполный	Полный
Преимущества платформы смарт-контрактов	Передовое сообщество разработчиков; большое количество литературы на разных языках; масштабируемость; самое широкое распространение среди всех блокчейн-платформ	Объединенный майнинг с Bitcoin; виртуальная машина RVM легко совместима с Ethereum DApp; масштабируемость; встроенная поддержка оракулов	Децентрализованная и открытая база данных; возможность применения множественных подписей; низкий расход энергии; высокая скорость обработки транзакций; выполнение кода в Docker-контейнерах	Максимальная простота токенизации; собственная децентрализованная биржа DEX; расширенный функционал платформы; использование платформы в государственных и корпоративных структурах	Возможность формальной верификации смарт-контрактов; простой для изучения ЯП; масштабируемость; высокая пропускная способность; высокий уровень безопасности системы
ЯП смарт-контрактов	Solidity, Vyper, LLL, Serpent и Mutan	Solidity	Python, JavaScript, Golang, PHP и другие общедоступные ЯП	RIDE, а также общедоступные ЯП	Michelson
Недостатки платформы смарт-контрактов	Возможные сбои в работе системы при переключении механизма консенсуса; большое количество уязвимых смарт-контрактов на платформе; низкая скорость транзакций; криптовалюты в Ethereum сверх волатильны	Дополнительная нагрузка на блокчейн Bitcoin; низкая распространенность платформы; смарт-контракты часто подвержены ошибкам	Не подходит для разработки сложных смарт-контрактов; несовершенная система безопасности; ежегодная инфляция в 1 %; низкая доходность содержания сетевого узла	Узконаправленная для использования платформа; относительно небольшая база пользователей; сниженный уровень анонимности; подверженность техническим сбоям; отсутствие открытого протокола для разработки собственных оракулов	Задержка в выдаче токенов; принудительный протокол KYC; разногласия в команде разработчиков; сложный для изучения ЯП смарт-контрактов
Целевое назначение платформы	Универсальная для смарт-контрактов (ICO, DApp и т. д.)	Для осуществления быстрых платежей, микрокредитования и т. д.	Для проведения ICO	Для проведения ICO (в том числе крауд-фандинговых компаний)	Универсальная для смарт-контрактов (ICO, DApp и т. д.)

Выводы

По результатам анализа ключевых характеристик платформ смарт-контрактов можно сделать вывод, что однозначно невозможно выбрать ту или иную платформу для применения, поскольку все они обладают своими особенностями, преимуществами и недостатками.

Кроме того, каждая рассмотренная платформа для смарт-контрактов создана для совершенно разных целей и применяется в разных областях, начиная от финансов и заканчивая аэрокосмической и полупроводниковой промышленностью. Поэтому для того, чтобы однозначно выбрать блокчейн-платформу для разработки смарт-контрактов, необходимо прежде

всего определить цель и основные задачи, которые придется решить в рамках реализации того или иного проекта, после чего уже перейти к разработке бизнес-модели использования блокчейн-платформы и техническим требованиям. Только после досконального анализа и выполнения этих шагов можно перейти к выбору блокчейн-платформы.

Если все же нет уверенности в выборе правильной блокчейн-платформы для конкретного бизнеса, следует проконсультироваться с экспертами в области блокчейна, которые смогут помочь превратить идею проекта в реальный продукт, применяя при этом весь накопленный опыт.

Литература

1. Репин М. М., Кривоногов А. А. Проблемы обеспечения информационной безопасности смарт-контрактов в системах на основе технологии распределенных реестров. — М.: ООО "Издательство ТРИУМФ", 2020. — 115 с.
2. Blockchain Market by Component (Platform and Services), Provider (Application, Middleware, and Infrastructure), Type (Private, Public, and Hybrid), Organization Size, Application Area (BFSI, Government, IT & Telecom), and Region — Global Forecast to 2025. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/blockchain-technology-market-90100890.html> (дата обращения: 10.03.2021).
3. Пителинский К. В., Александрова А. В. Смарт-контракты: принципы работы, преимущества и перспективы // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2020. № 1(145). С. 9—14.
4. Репин М. М., Пшихотская Е. А. Обеспечение информационной безопасности смарт-контрактов в системах на основе технологии распределенных реестров // Системный администратор. 2019. № 5(198). С. 70—73.
5. Buterin Vitaly. A next generation smart contract & decentralized application platform [Электронный

ресурс]. URL: https://cryptorating.eu/whitepapers/Ethereum/Ethereum_white_paper.pdf (дата обращения: 12.03.2021).

6. Garriga Martin, Arias Maximiliano, Renzis de Alan. Blockchain and Cryptocurrency: A comparative framework of the main Architectural Drivers [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1812.08806.pdf> (дата обращения: 12.03.2021).

7. Кривоногов А. А., Репин М. М., Федоров Н. В. Методика анализа уязвимостей и определения уровня безопасности смарт-контрактов при размещении в системах распределенных реестров // Вопросы кибербезопасности. 2020. № 4(38). С. 56—65.

8. Lerner Demian Sergio. RSK White Paper Overview [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rsk.co/Whitepapers/RSK-White-Paper-Updated.pdf> (дата обращения: 14.03.2021).

9. Zheng Zibin, Xie Shaoan, Hong-Ning Dai, Weili Chen, Xiangping Chen, Jian Weng, Muhammad Imran. An Overview on Smart Contracts: Challenges, Advances and Platforms [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1912.10370.pdf> (дата обращения: 16.03.2021).

10. Khan Nida, Ahmad Tabrez, State Radu. Feasibility of Stellar as a Blockchain-based Micropayment System // SmartBlock 2019: Smart Blockchain. 2019. V. 11911. P. 53—65.

11. Tyurin A., Tyuluandin I. V., Maltsev V., Kirilenko I., Berezun D. Overview of the Languages for Safe Smart Contract Programming // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. 2019. № 31. P. 157—176.

12. Takyar Akash. Top blockchain platforms to explore in 2021 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.leewayhertz.com/top-blockchain-platforms/> (дата обращения: 17.03.2021).

13. Техническое описание платформы Waves Enterprise [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.wavesenterprise.com/ru/latest/wedocs.pdf> (дата обращения: 18.03.2021).

14. Allombert V., Bourgoin M., Tesson J. Introduction to the Tezos Blockchain [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1909.08458.pdf> (дата обращения: 19.03.2021).

PROSPECTIVE SMART CONTRACT PLATFORMS AS A NEW ROUND OF DEVELOPMENT OF THE GLOBAL MARKET OF DIGITAL TECHNOLOGIES

A. A. Krivonogov, K. V. Pitelinskiy, N. V. Fedorov
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

This article discusses the development trends of the global market for blockchain technologies and smart contracts. A comparative analysis of the most common and promising platforms for the development and algorithmic implementation of smart contracts is performed. The key features of the operation of each of the blockchain platforms during the development of digital technologies, the emergence of new applications and financial services, as well as in the context of the COVID-19 pandemic are revealed.

Keywords: blockchain technology, token, consensus algorithm, data model, programming language, Turing completeness, decentralized application, virtual machine, financial technology.

Кривоногов Антон Алексеевич, аспирант.

E-mail: aakrivonogov97@yandex.ru

Пителинский Кирилл Владимирович, доцент, MBA, магистр делового администрирования, доцент кафедры "Информационная безопасность".

E-mail: yekadath@gmail.com

Федоров Николай Владимирович, доцент, заведующий кафедрой "Информационная безопасность".

E-mail: fedorovnv31@mail.ru

Статья поступила в редакцию 1 июля 2021 г.

УДК 001.51:001.8:004:623.618:658.5
DOI: 10.52190/2073-2597_2021_4_53

НЕКОТОРЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Е. И. Митрушкин, д-р техн. наук; С. Ю. Баландин, канд. техн. наук
АО «Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт
автоматической аппаратуры им. академика В. С. Семенихина», Москва, Россия

Предложены направления совершенствования и развития автоматизированных систем в целях обеспечения обороноспособности и технологического развития страны.

Ключевые слова: автоматизированная система, направления совершенствования и развития, комплексная программа развития автоматизированных систем.

Угрозы цивилизации

Человечество переживает не лучшие времена. Обострились глобальные угрозы человечеству, ставящие в опасность само существование цивилизации. К основным угрозам относятся следующие (см., например, [1]).

- Группа угроз "ПРИРОДА":
 - истощение природных ресурсов планеты; разрушение биосферы;
 - мутация микроорганизмов и вирусов, глобальная пандемия;
 - экологический крах; климатические изменения, глобальное потепление;
 - природные катаклизмы — землетрясения, цунами, наводнения, вулканические извержения; смена магнитных полюсов планеты; разрушение озонового слоя Земли;
 - угрозы из космоса — метеоритная опасность и аномальные вспышки, выбросы при изменениях солнечной активности.
- Группа угроз "ОБЩЕСТВО":
 - новая демографическая революция; недостаток продуктов питания; социальное расслоение общества; миграционный кризис;
 - мировое противостояние культур; мировоззренческие религиозные и межнациональные противоречия;
 - геостратегическая напряжённость (крах глобального миропорядка, информационные войны, угроза новой мировой войны, возможность ядерной войны);
 - глобальное недоверие к политическим убеждениям;
 - научный, технический и технологический прогресс (компьютеризация, "тёмная сторона" Интернета, виртуализация общества, искусственный интеллект).
- Группа угроз "ЧЕЛОВЕК":
 - биологические и психологические изменения человека;

- снижение уровня образованности, интеллектуальная и нравственная деградация личности; трансформация института семьи;
- "разрыв поколений" в культуре, науке, образовании, сфере высоких технологий и т. д.

Обеспечение обороноспособности и технологического развития страны

Защита цивилизации от возможных угроз представляет собой сверхглобальную проблематику. Поэтому в предлагаемой работе отражён лишь подход к разрешению частных, но важных проблем противодействия мирового противостояния культур и геостратегической напряжённости, обуславливающего необходимость постоянного обеспечения обороноспособности и технологического развития нашей страны.

Мировая гонка технологий приводит к внедрению самых современных инноваций в важнейшие сферы деятельности. Любое отставание от соперников может привести к увеличению уязвимости обороноспособности страны. В частности, существующие методы построения и информационные технологии автоматизированных систем (АС) не в полной мере обеспечивают всё возрастающие требования к их процессам, сервисам и характеристикам.

В целях обеспечения обороноспособности и технологического развития страны необходим комплекс перспективных направлений совершенствования и развития автоматизированных систем специального и гражданского назначения.

Направления совершенствования и развития АС

Для создания указанного комплекса намечены и проработаны различные направления совершенствования и развития всего многообразия АС. Разобъёмность этих направлений

обуславливает необходимость их систематизации и создания многоуровневой архитектуры.

На основании системного подхода (от большего к частному) авторами предложена многоуровневая взаимоувязанная архитектура важнейших направлений и информационных технологий совершенствования и развития АС. Она включает следующие направления совершенствования:

- АС в целом;
- объектов автоматизации АС;
- методов и технологий процессов управления;
- технологий обработки информации;
- технологий телекоммуникаций;
- систем и технологий связи;
- комплексов средств автоматизации и связи;
- комплексной системы безопасности АС;
- методов эксплуатации АС;
- методов исследования АС;
- информационной поддержки жизненного цикла АС.

Рассмотрим некоторые из них. Фрагментарность и краткость изложения обусловлена недостаточной проработкой конкретных направлений, методов и технологий.

Совершенствование и развитие АС в целом

К основным путям совершенствования и развития АС относятся интеграция автоматизированных систем:

- создание систем коллективного пользования с общим информационным пространством;
- миграция атомарных АСУ и/или их модулей на виртуальные ресурсы;
- интеграция различных автоматизированных систем силового блока, предприятий оборонно-промышленного комплекса, российских финансовых и бизнес-структур для эффективного использования накопленных информационных и вычислительных ресурсов;
- обеспечение катастрофоустойчивой архитектуры АС и т. д.

Совершенствование объектов автоматизации АС

К основным путям совершенствования объектов автоматизации (автоматизированных объектов) АС относится интеграция:

- разнородных комплексов каждого объекта автоматизации [2];
- организационных, управляющих, информационных и исполнительных процессов и средств и т. д.

Совершенствование методов и технологий процессов управления

К основным путям совершенствования технологий процессов управления в АС относятся:

- сетцентрическое управление;
- удалённое управление, в том числе в движении;
- автоматизированное планирование;
- интеллектуализация труда, в том числе поддержки принятия решений;
- нейросетевые алгоритмы управления, технологии искусственного интеллекта;
- роботизация (наземная, воздушная, подводная и иная);
- алгоритмы адаптации и обеспечения отказоустойчивости систем управления и т. д.

Совершенствование технологий обработки информации

К основным путям совершенствования технологий обработки информации в АС относятся:

- единое информационное пространство (интеграция информационных ресурсов);
- мультиоблачная обработка информации;
- информационно-аналитические системы (технологии искусственного интеллекта, Big Data, Data mining, нейросети);
- распределённая обработка непрерывных последовательных цепочек блоков (связных списков, блокчейн);
- оперативное информационное восстановление средств, комплексов и объектов после потери их работоспособности из-за сбоев, отказов, частичного разрушения и т. д.

Совершенствование технологий телекоммуникаций

К основным путям совершенствования технологий телекоммуникаций в АС относятся:

- создание защищённой инфотелекоммуникационной платформы для нужд обороны и безопасности государства;
- использование новых алгоритмов обмена данными и управления потоками для снижения времени доставки информации;
- квантовые технологии передачи данных для повышения скрытности обмена данными;
- технологии Службы распространения данных DDS;
- виртуализация сетевых функций NFV;
- применение искусственного интеллекта для управления сетью;
- оперативная перенастройка сети под текущую оперативную задачу и др.

Совершенствование систем и технологий связи

К основным путям совершенствования систем и технологий связи в АС относятся:

- спектральное уплотнение каналов DWDM;
- технологии сетей доступа 5G, SDN/NFV, SDR/NFV;
- беспроводная энергоэффективная сеть дальнего действия (LPWAN);
- мультисервисные цифровые системы связи и т. д.

Совершенствование комплексов средств автоматизации и связи

К основным путям совершенствования комплексов средств автоматизации и связи АС относятся:

- модульная архитектура построения комплексов средств автоматизации и связи, упрощающая их дальнейшую модернизацию [2];
- кластерная архитектура;
- гиперконвергентная платформа (горизонтально или вертикально масштабируемая вычислительная сеть) и т. д.

Совершенствование систем обеспечения безопасности АС

К основным путям совершенствования системы безопасности АС относятся:

- интеграция систем обеспечения безопасности взаимодействующих АС (создание интегрированной системы обеспечения безопасности АС);
- многорубежная комплексная система обеспечения безопасности АС (от рубежа защиты АС в целом до рубежа защиты информации) [3];
- кибербезопасность (доверенное программное обеспечение, доверенная единая среда разработки; защита закрытых информационных и вычислительных ресурсов) и т. д.

Совершенствование методов эксплуатации АС

К основным путям совершенствования методов эксплуатации АС относятся:

- использование искусственного интеллекта при проведении обслуживания;
- дистанционная поддержка обслуживания комплексов;
- подготовка обслуживающего персонала с использованием методов "Дополненной реальности" и т. д.

Совершенствование методов исследования АС

К основным путям совершенствования методов исследования АС и их составных частей относятся:

- создание обобщённой методологии исследования АС;
- формирование общепризнанной иерархии характеристик и критериев эффективности АС и их составных частей [2];
- создание инженерных методов оценки характеристик и эффективности АС и их составных частей;
- углубление методологии моделирования предметной области, создание иерархии типовых моделей и т. д.

Совершенствование информационной поддержки жизненного цикла АС

К основным путям совершенствования информационной поддержки жизненного цикла АС относятся:

- совершенствование нормативно-технической документации (НТД) и создание единой НТД в области автоматизации;
- систематизация, обобщение и перевыпуск ГОСТов и руководящих документов в области автоматизации;
- создание единого перечня терминов и их определений в области автоматизации и т. д.

Выводы

Представленная архитектура, по мнению авторов, в достаточно полной степени освещает широкий спектр перспективных направлений и путей совершенствования и развития автоматизированных систем специального и гражданского назначения, а также их составных частей.

Указанные направления и пути могут быть использованы в качестве базиса для формирования комплексной программы совершенствования и развития конкретной автоматизированной системы.

Архитектура может быть уточнена и дополнена по результатам исследования и проработки конкретных направлений, путей и технологий.

Литература

1. Колин К. К. Глобальные угрозы развитию цивилизации в XXI веке // Стратегические приоритеты. 2014. № 1. С. 6—30.
2. Митрушкин Е. И. Системотехника. Инженерные основы автоматизированных систем: учеб. пособие. — М.: Московский гос. институт радиотехники, электроники и автоматики, 2013. — 200 с.
3. Митрушкин Е. И., Шавыкин В. Р. Безопасность распределённой автоматизированной системы // Вопросы защиты информации. 2020. № 1(128). С. 42—48.

SOME DIRECTIONS OF IMPROVEMENT AND DEVELOPMENT OF AUTOMATED SYSTEMS

E. I. Mitrushkin, S. Yu. Balandin

Stock Company "Research Institute for Automated Apparatus named after
academician V. S. Semenikhin", Moscow, Russia

The directions of improvement and development of automated systems are proposed in order to ensure the defense capability and technological development of the country.

Keywords: automated system, directions of improvement and development, a comprehensive program for the development of automated systems.

Митрушкин Евгений Иванович, профессор, учёный секретарь.

E-mail: 89629785042@mail.ru

Баландин Сергей Юрьевич, начальник центра научно-технической поддержки.

E-mail: sybalandin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 5 июля 2021 г.