

# ОБОРОННЫЙ КОМПЛЕКС — научно-техническому прогрессу России



- МАШИНОСТРОЕНИЕ
- ПРИБОРОСТРОЕНИЕ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
- ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ
- СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ  
И ИЗМЕРЕНИЯ



3'2021



## 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](mailto:izdanie@ntckompas.ru)



# 3 (151) ОБОРОННЫЙ КОМПЛЕКС - научно-техническому прогрессу России

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1984 г.

Москва 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Абрамкина К. В., Марковкина Н. Н., Сметух Н. П., Кучеренко В. А.* Сравнительный анализ сред разработки Matlab и Comsol для реализации управления акустическим полем левитации с помощью ультразвуковых пьезоизлучателей..... 3

*Моисеев И. С., Жиленков А. А., Ениватов В. В.* Проблемы моделирования динамики механических систем и их решение методами интеграторов ЛИ..... 9

### ИЗМЕРЕНИЯ. ИСПЫТАНИЯ. КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

*Кабаков В. В.* Внедрение технологии блокчейн в логистическую цепь материально-технических ресурсов ..... 16

*Дадашев М. Н., Джафаров Р. Ф., Куропаткин Г. Ю.* Перспективы внедрения элементов машинного обучения для увеличения механической скорости проходки ..... 21

*Уланов Д. В.* Проблемные вопросы оценки трудоёмкости проектирования аппаратуры вооружения, военной и специальной техники.... 26

### ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ОБОРУДОВАНИЕ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. РАДИОТЕХНИКА. ЭЛЕКТРОНИКА

*Пиликов Н. А., Щеглов Д. К.* Технология аутентичной конвертации проектных данных параметрических CAD-систем ..... 34

*Пителинский К. В., Федоров Н. В., Маковей С. О., Сигида М. П.* Классификация бионической робототехники и обзор некоторых ее зарубежных образцов..... 39

*Лушина Е. Ю.* Легирование катодных материалов редкоземельными металлами для увеличения емкостных свойств литий-ионных аккумуляторов ..... 51

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

*Крюков А. А., Джепа Д. С.* Антироссийские санкции: риски и новые возможности для высокотехнологичных производств ..... 56

*Плиплин А. А., Родионов А. В., Лобов Д. О.* К вопросу организации войскового ремонта новых образцов вооружения и военной техники в строевых частях..... 64

**Главный редактор**

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

**Заместители главного редактора**

**Ю. А. Чаплыгин**, академик РАН, д-р техн. наук, проф., президент, заведующий кафедрой «Интегральная электроника и микросистемы», МИЭТ

**С. А. Матвеев**, канд. техн. наук, начальник Центра автоматических космических систем и комплексов ФГУП "ЦНИИмаш"

**Ответственный секретарь — К. В. Трыкина,**

начальник отдела научных и информационных изданий ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

**Редакционная коллегия:**

**В. И. Борисов**, академик РАН, д-р техн. наук, проф., научный руководитель — зам. генерального директора по научной работе ОАО «Концерн «Созвездие»; **Б. А. Григорьев**, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН, научный руководитель Центра исследований пластовых систем и технологического моделирования ООО «Газпром ВНИИГАЗ», зав. кафедрой «Исследование нефтегазовых пластовых систем» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина; **С. Ю. Желтов**, академик РАН, д-р техн. наук, проф., генеральный директор ФГУП «ГосНИИАС»; **И. А. Каляев**, академик РАН, д-р техн. наук, проф., директор НИИ многопроцессорных вычислительных систем ЮФУ (НИИ МВС ЮФУ); **В. М. Кашин**, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., генеральный директор — генеральный конструктор ФГУП «Конструкторское бюро машиностроения»; **Ю. Н. Коптев**, д-р техн. наук, проф., председатель научно-технического совета Госкорпорации «Ростехнологии»; **Ю. И. Маевский**, д-р техн. наук, проф., генеральный конструктор систем и средств РЭБ — зам. генерального директора по инновациям и научной работе ОАО «Концерн Радиоэлектронные технологии»; **Б. В. Обносов**, д-р техн. наук, проф., действительный член РАН, генеральный директор — генеральный конструктор ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»; **В. В. Рыжаков**, д-р техн. наук, заслуженный деятель науки РФ, проф., профессор кафедры «Техническое управление качеством» Пензенского государственного технологического университета (Пенз. ГТУ); **Л. Г. Сидоренко**, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РАН, генеральный конструктор по специальной тематике ОАО «ЦКБ МТ «Рубин»; **П. А. Созинов**, д-р техн. наук, проф., генеральный конструктор ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей»; **Н. И. Турко**, д-р воен. наук, канд. техн. наук, заслуженный деятель науки РФ, проф., первый вице-президент Академии военных наук

**Учредитель** Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»

*Перепечатка материалов и использование их в любой форме, в том числе электронной, без предварительного письменного разрешения редакции не допускаются.*

УДК 681.5

DOI: 10.52190/1729-6552\_2021\_3\_3

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СРЕД РАЗРАБОТКИ MATLAB И COMSOL ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИМ ПОЛЕМ ЛЕВИТАЦИИ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПЬЕЗОИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

К. В. Абрамкина; Н. Н. Марковкина, канд. техн. наук  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»,  
Санкт-Петербург, Россия

Н. П. Сметюх, канд. техн. наук; В. А. Кучеренко  
ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,  
г. Керчь, Россия

*Рассмотрены проблемы моделирования акустического поля левитации, формирования данного поля. Приведены расчеты возмущений и моделирование "провального" элемента для фазированных решеток с датчиками ультразвука размером 16×16 в среде Matlab. Представлены и смоделированы примеры измерения расстояния и распознавания объектов, измерения уровня или скорости, сварки или склеивания, тестирования с высоким разрешением.*

*Ключевые слова:* Matlab, управление, моделирование, акустика, левитация.

Рассмотрены программные среды для разработки Matlab и COMSOL и их проекты. Целью исследования является сравнение параметров и технических характеристик для моделирования поля акустической левитации для решеток с пьезоизлучателями. В среде разработки Matlab рассмотрены процессы формирования ультразвукового поля, получен расчет возмущений и сбоя элементов решетки из датчиков ультразвука. В среде Comsol проанализированы структура и расчет полного акустического давления.

Проанализируем акустическое поле левитации в стоячей волне. Данное поле можно использовать для левитации объектов с диаметром менее половины  $\lambda$ . Эффект достигается с помощью излучателя звука и отражателя (обычно вогнутой формы для лучшей фокусировки) или двух и более излучателей звука. В первом случае в пространстве между отражателем и излучателем возникает интерференция излучаемых и

отраженных волн одинаковой частоты и фазы. Во втором имеет место интерференция излучаемых волн от двух и более излучателей звука. Ослабевающие излученные волны усиливаются встречными волнами от отражателя или второго излучателя звука. В результате получается поле левитации стоячей волны.

Если использовать 4 излучателя звука, то можно получить 2 пересекающихся поля левитации стоячей волны для контроля пространства по 3 осям.

Поперечная сила излучения (радиальная сила) — это сила давления, действующая в поперечном направлении относительно первичной силы. Эта сила возникает из-за того, что объект в поле является препятствием, поэтому среда обтекает частицу. Данный эффект ограничен областью около частицы.

Для определения давления акустического излучения на сферу используется теория Кинга [1]:

$$\delta p = p - p_0 = p_0 \dot{\phi} + \frac{1}{2} \frac{p_0}{c^2} \dot{\phi}^2 - \frac{1}{2} p_0 q^2, \quad (1)$$

где  $\dot{\phi}$  — потенциал скорости

$$\dot{\phi} = \frac{D\phi}{Dt} - \xi \frac{d\phi}{dx} - \eta \frac{d\phi}{dy} - \zeta \frac{d\phi}{dz} = \frac{D\phi}{Dt} + u\xi + v\eta + w\zeta, \quad (2)$$

$q^2/c^2$  — конечный результат;  
 $c^2$  — постоянная;

Абрамкина Кристина Вадимовна, инженер, ассистент.

E-mail: kristya1808@mail.ru

Марковкина Наталья Николаевна, инженер.

E-mail: natalia.markovkina@gmail.com

Сметюх Надежда Павловна, доцент.

E-mail: sergiiblack@gmail.com

Кучеренко Владислав Александрович, курсант.

E-mail: vlad.kucherenko1@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13 мая 2021 г.

© Абрамкина К. В., Марковкина Н. Н.,  
Сметюх Н. П., Кучеренко В. А., 2021

$\frac{dp}{d\rho}, d\rho$  — плотность среды;

$\xi, \dot{\eta}, \dot{\zeta}$  — вклады второго порядка в вариации давления над границей с тем же порядком величины.

Скорость потока вокруг частицы уменьшается с увеличением дистанции [2]:

$$\dot{\Phi} - \int \frac{dp}{\rho} = \frac{v^2}{2}. \quad (3)$$

Это создает дополнительное давление, которое растет с увеличением дистанции, что ведет к стабилизации частицы [3].

Акустическая сила для небольшого твердого тела составляет

$$8\pi r_s (kr_s) \bar{E} \sin(2kh) f \left( \frac{p_0}{p_s} \right), \quad (4)$$

где  $k$  — количество волн;

$r_s$  — радиус сферы;

$E$  — полная энергия звука в среде;

$f$  — коэффициент относительной плотности;

$p_s$  — плотность сферы.

С учетом силы (4) нет необходимости в том, чтобы отражатель и излучатель были перпендикулярны вертикальной оси. Пока угол относительно оси не превышает определенных величин, объект будет левитировать даже, если сила тяжести не преодолевает сумму главной и поперечной сил [4, 5].

### Программная среда Matlab для управления полем акустической левитации

Исследуем возможности пакета инструментов для систем с фазированными решетками в Matlab для решения поставленных целей и задач исследования.

Прежде всего необходимо рассмотреть процесс создания планарных решеток для устройства акустической левитации [6, 7]. Рассмотрим формирование планарной решетки в данном листинге 1. Для начала необходимо определить количество элементов решетки в каждом ряду и каждом столбце. Для заданного устройства левитации достаточно сформировать решетку 16×16, в которой расположены датчики ультразвука. Кроме того, нужно задать расстояние между элементами (излучателями) также в каждом ряду

и каждом столбце. В итоге получим 256 элементов (рис. 1).

Листинг 1

```
M = 16; % Number of elements on each row
N = 16; % Number of elements on each column
dy = 0.5; % Spacing between elements on each row (m)
dz = 0.5; % Spacing between elements on each column (m)
ura = phased.URA([N M],[dz dy]);
```

```
viewArray(ura,'Title','Uniform Rectangular Array (URA)');
```

Uniform Rectangular Array (URA)

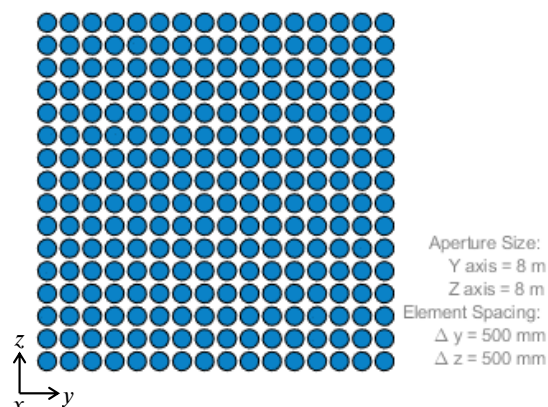


Рис. 1. Планарная решетка с излучателями

На рис. 2, а представлен график амплитудных возмущений для решетки излучателей размером 16×16. Он отражает зависимость нормализованного распределения мощности от напряжения. В данном случае возмущения принимаются за статистически независимые гауссовские случайные величины. Показано соотношение идеальной амплитуды и амплитуды с возмущениями.

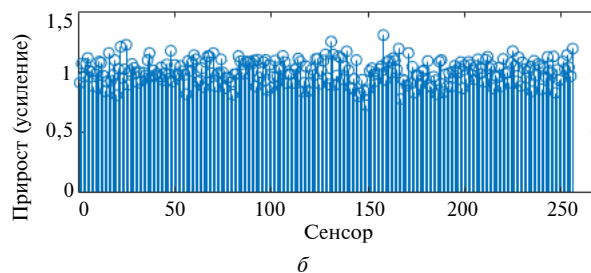
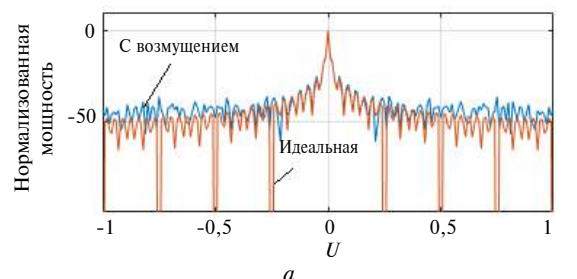


Рис. 2. Амплитудные возмущения (а) и спадающее распределение поля (б)

На рис. 2, б представлено амплитудное сужение как показатель прироста (усиления) возмущений (искажений).

По данным графикам можно провести сравнение резонанса для всех 256 датчиков ультразвука (амплитудное сужение), для датчиков в ряду с возмущениями и в "идеальном" ряду ответ на возмущения. Можно сравнить амплитуду резонанса с возмущениями и идеальную амплитуду (наблюдается превышение по гауссовским значениям "провальных" элементов) [8].

На рис. 3, а продемонстрировано добавление фазовых возмущений по алгоритму первой части, только при сужении имеем масштаб один и фазовый сдвиг 0 (в предыдущем примере были распространены случайные числа, равные единице, как и в данном примере).

Можно проанализировать соотношение между идеальной фазовой амплитудой и амплитудой

с возмущениями, а также проследить за резонансом, при котором можно наблюдать отклонения по значениям сенсоров (например, в диапазоне от 100 до 150) (рис. 3, б).

Можно отобразить как нужно изменить положение каждого датчика с возмущениями по трем осям (направлениям) (рис. 4). Соответственно существует возможность перестроить ряд. Здесь отражена зависимость мощности от напряжения (при позиционных возмущениях).

Рассмотрим модель возмущений на рис. 5, где изображены модели с изотропной характеристикой и с возмущениями. Сравнивая резонанс для случаев с возмущениями и без возмущений (в изотропной среде), можно сделать вывод о том, что в изотропной модели характеристика по мощности обладает лучшими показателями по сравнению со второй моделью [9].

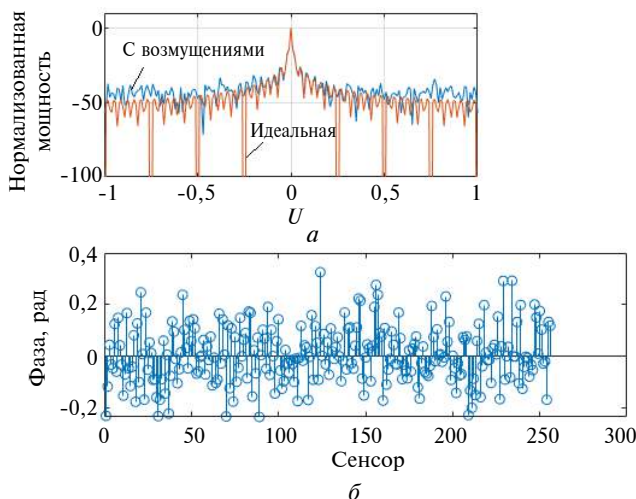


Рис. 3. Фазовые возмущения (а) и сужение амплитуды (б)

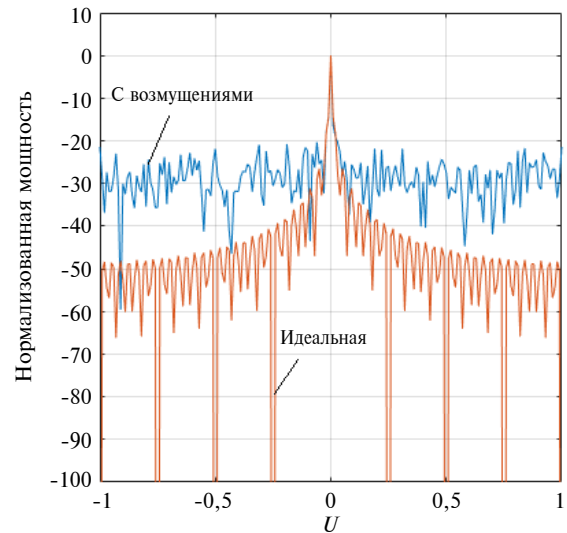


Рис. 4. Позиционные возмущения

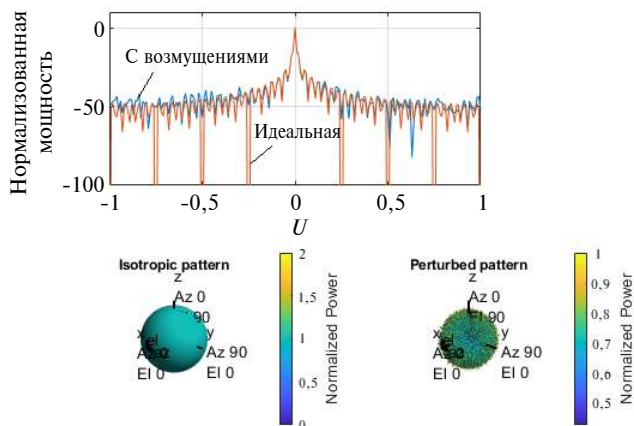


Рис. 5. Модель возмущений

Сбой в работе некоторых элементов решетки 16×16 пьезоизлучателей показан на рис. 6. Каждый из 256 излучателей имеет десятипроцентный шанс на сбой. На графике отображена зависимость нормализованной мощности от напряжения в случаях со сбоем и без сбоя в работе излучателей. Нужно обратить внимание на то, как трудно получить глубокий ноль для ряда элементов со сбоем при отклике, что отображено на графике для решетки 16×16.

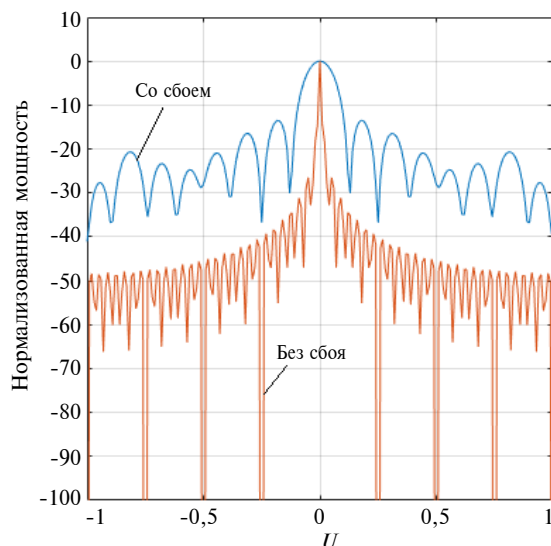


Рис. 6. Сбой элементов

На рис. 7 изображена требуемая решетка с ультразвуковыми излучателями 16×16 с "провальными" элементами.

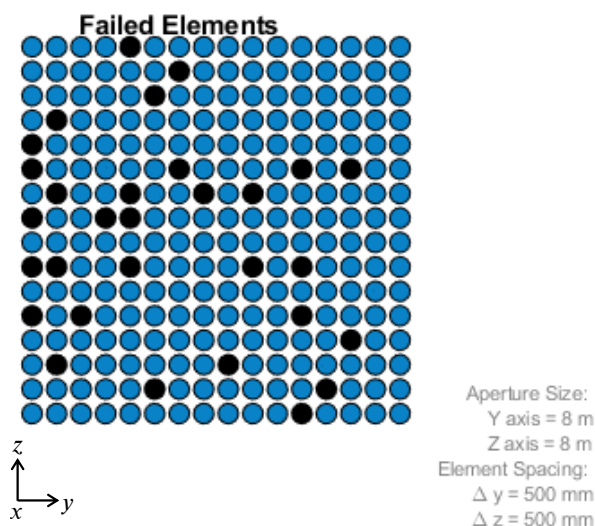


Рис. 7. Изображение ряда с "провальными" элементами

Подводя итоги и суммируя результаты, можно сделать вывод о том, что получены отклики

для всех элементов массива, проведено моделирование для всех случаев возмущений, а также рассмотрено влияние отклика (резонанса) для всех случаев. На рис. 7 получено отображение элементов со сбоями в работе при генерации ультразвуковых колебаний с заданной частотой для 256 элементов решетки.

### Моделирование поля акустической левитации в Comsol Multiphysics

Проведем анализ моделирования датчика ультразвуковой левитации. Как шаблон выберем модель из Comsol Multiphysics. Далее проанализируем графики этой модели. В данном программном решении можно рассматривать также материал и геометрию предполагаемого изделия и выполнять необходимые физико-математические расчеты.

На рис. 8 проанализирована зависимость расстояния от давления акустического поля. По результатам наблюдений можно сделать вывод, что при увеличении расстояния давление падает, как и должно быть при испытании в реальной среде [10].

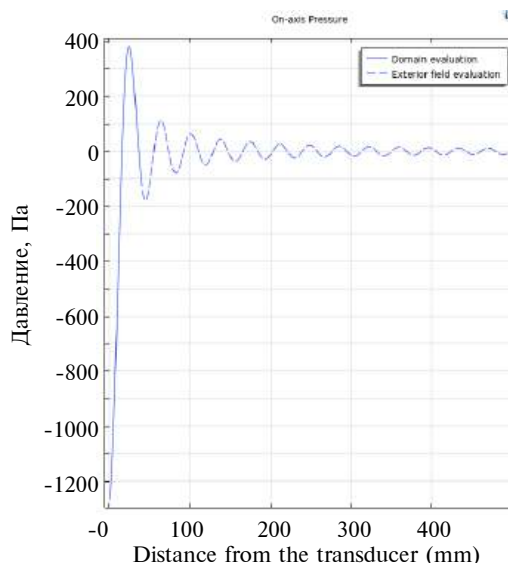


Рис. 8. Зависимость давления от дистанции

На рис. 9 показана частотная область. Можно рассчитать ее при помощи формул

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{dp_t}{dt} + \nabla^* u_t = Q_m; \quad (5)$$

$$\rho \frac{du_t}{dt} + \nabla^* (p_t I) = q_d \quad (6)$$

рассмотреть акустическое давление как функцию частоты. Также виден в сумме расчет пол-



ного акустического давления с ранжированием по зонам датчика ультразвука [9—11].

## Заключение

Итак, авторами исследованы возможности рассмотренных программных пакетов для расчета и моделирования систем акустической левитации, а также для расчета и управления акустическим полем левитации.

Среда Matlab позволяет добавить систему управления, что позволит непосредственно контролировать работу устройства акустической левитации.

С другой стороны, в среде Comsol в полной мере могут быть реализованы расчеты акустических систем разных размеров по параметрам, применена теория управления акустическим полем и интегрирована в среду Matlab.

Создание системы управления можно провести непосредственно в среде Matlab, однако она ограничена в базовых системах расчета.

Интеграция двух пакетов позволит создать основу для реализации системы управления акустическим полем левитации.

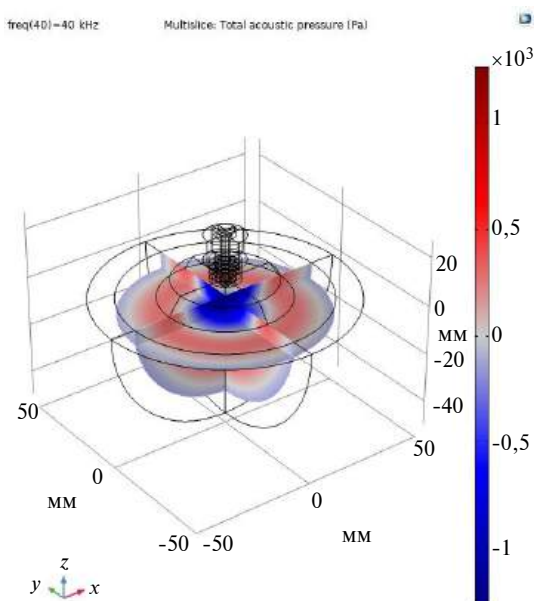


Рис. 9. Полное акустическое давление

## ЛИТЕРАТУРА

1. **King Louis Vessot.** On the acoustic radiation pressure on spheres: Proc. R. Soc. Lond. A147. P. 212—240.
2. **Vandaele V., Lambert P., Delchambre A.** Non-contact handling in microassembly: acoustical levitation // Precision Engineering. 2005. V. 29. P. 491—505.
3. **Zhao S.** Investigation of non-contact bearing systems based on ultrasonic levitation // Ph. D. Thesis. — Germany: University of Paderborn, 2010. P. 107.
4. **Жиленьков А. А., Черный С. Г.** Применение технологий искусственного интеллекта в автоматизации контроля и управления в системах активных фазированных решеток для геоинформационного комплекса // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2020. № 2(146). С. 57—63.
5. **Castro A.** Manipulation of biomimetic objects in acoustic levitation. — France: University Pierre et Marie Curie, 2013. P. 187.
6. **Dang B., Zhilenkov A.** Finite precision modeling of radar digital chaotic systems with dynamical properties analysis: AIP Conference Proceedings 2034, 020007 (2018) [Электронный ресурс]: <https://doi.org/10.1063/1.5067350>
7. **Zhilenkov A. A.** High productivity numerical computations for gas dynamics modelling based on DFT and approximation: 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow, 2018. P. 400—403. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317117.
8. **Lisitsa D., Zhilenkov A. A.** Comparative analysis of the classical and nonclassical artificial neural networks: 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg, 2017. P. 922—925. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910707.
9. **Chernyi S. G., Vyngra A. V., Erofeev P., Novak B. P.** Analysis of the starting characteristics of the complex maritime systems: Procedia Computer Science. International Conference on Computational Intelligence and Data Science, ICCIDS 2019. 2020. P. 2164—2171.
10. **Zhilenkov A. A., Chernyi S. G.** Automatic estimation of defects in composite structures as disturbances based on machine learning classifiers oriented mathematical models with uncertainties // J. Information Technologies and Computing Systems. 2020. № 3. P. 13—29.
11. **Ивановский А. Н., Марковкина Н. Н., Черный С. Г.** Выделение марки углубления на изображении с использованием алгоритмов компьютерного зрения // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 1—2(51). С. 102—107.

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF MATLAB AND COMSOL DEVELOPMENT ENVIRONMENTS FOR THE IMPLEMENTATION OF CONTROL OF THE ACOUSTIC FIELD OF LEVITATION USING ULTRASONIC PIEZO EMITTERS**

*K. V. Abramkina, N. N. Markovkina*

St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

*N. P. Smetyukh, V. A. Kucherenko*

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia

*In this work, the problems of modeling the acoustic field of levitation, the formation of this field were considered. The calculations of disturbances and modeling of the "failure" element for phased arrays with ultrasound sensors 16×16 in the Matlab environment are shown. Consider and simulate examples of distance measurement and object recognition, level or velocity measurements, welding or gluing, high resolution testing.*

*Keywords:* Matlab, control, modeling, acoustics, levitation.

*Bibliography* — 11 references.

*Received May 13, 2021*

УДК 519.876.5

DOI: 10.52190/1729-6552\_2021\_3\_9

## ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ИХ РЕШЕНИЕ МЕТОДАМИ ИНТЕГРАТОРОВ ЛИ

*И. С. Моисеев; А. А. Жиленков*, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»,  
Санкт-Петербург, Россия

*В. В. Ениватов*, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,  
г. Керчь, Россия

*Рассмотрены особенности моделирования двух видов механических систем: голономных и неголономных. В связи с тем что кинетические связи в неголономных системах приводят к их некоторым особенностям, которые отличают их от голономных, появляется необходимость поиска иных методов моделирования динамики неголономных систем. Проанализированы два таких метода, а именно метод вариационного интегрирования и метод интеграторов группы Ли. Проанализированы подходы к их синтезу и преимущества перед иными методами.*

*Ключевые слова:* голономные системы, неголономные системы, вариационные интеграторы, интегратор группы Ли, моделирование.

При наличии опытной модели механической системы на ней можно провести ряд испытаний в целях определения её характеристик. Однако для определения различных показателей системы при разных режимах работы может понадобиться большое количество экспериментов и большие затраты времени и средств (к примеру, на оснастку площадок для экспериментов, регулировку измерительных приборов, исследование и обработку полученных решений и т. д.). Также возникает проблема того, что при физических экспериментах невозможно исследование всех необходимых динамических показателей либо эксперимент может быть опасен сам по себе (рис. 1).

**Моисеев Илья Сергеевич**, бакалавр кафедры "Системы автоматического управления и бортовой вычислительной техники".

E-mail: fyodorone@gmail.com

**Жиленков Антон Александрович**, доцент, заведующий кафедрой "Киберфизические системы".

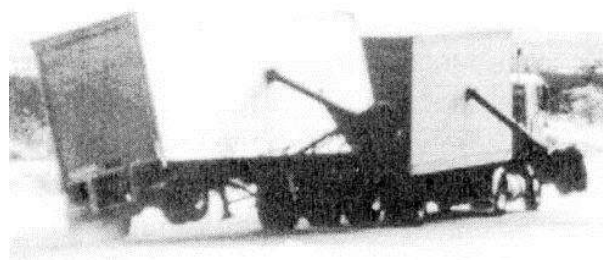
E-mail: marine\_electronics@corp.smtu.ru

**Ениватов Валерий Владимирович**, доцент, заведующий кафедрой "Судовые энергетические установки".

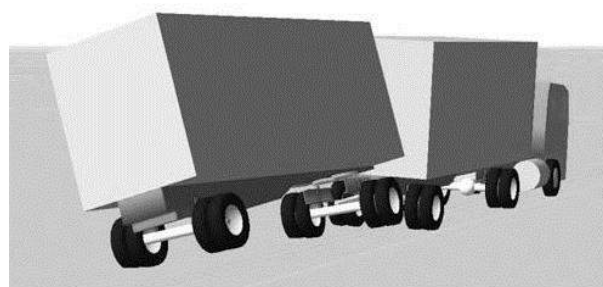
E-mail: valeriy.enivatov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 8 июня 2021 г.

© Моисеев И. С., Жиленков А. А., Ениватов В. В., 2021



а



б

**Рис. 1.** Проведение физических экспериментов, связанных с опасностью и требующих дополнительного оборудования в виде аутригера (а), и компьютерное моделирование (б)

Рассмотрим механическую систему. Ее конфигурацию опишем вектором координат  $\mathbf{q} \in Q$ . Пространство конфигураций  $Q$  — это  $n$ -мерное

гладкое многообразие. Для  $\mathbf{q}(t) \in Q$  обобщённая скорость — это вектор  $\dot{\mathbf{q}}$ . Механическая система может быть ограничена во многих случаях, например из-за своей конструкции или из-за того, как она движется и управляется. Ограничения могут быть двухсторонними и односторонними, зависеть от времени или нет. Рассмотрим голономные и неголономные ограничения [1–8].

### Голономные системы

Ограничения, которые могут быть заданы в виде

$$f_i(q) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, k < n), \quad (1)$$

являются голономными связями.

Систему, которая имеет только голономные ограничения, называют голономной системой. Смысл ограничений (1) заключается в том, чтобы лимитировать конфигурации системы  $(n - k)$ -мерным гладким многообразием  $Q$ .

Для моделирования таких систем используют подход, при котором сохраняются уравнения связи как таковые и решается система дифференциальных алгебраических уравнений.

Голономные ограничения зачастую вводятся механическими связями между различными телами системы. Примером такой системы может служить показанный на рис. 2 математический маятник.

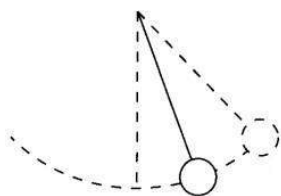


Рис. 2. Математический маятник

В данном случае голономной связью является нить, длина которой изменяется по некоторому закону.

Задача исследования динамики голономной системы является более простой, чем неголономной, поскольку для её решения можно пользоваться множеством методов и теорем (уравнение Лагранжа, уравнение Гамильтона и т. д.).

### Проблемы моделирования динамики неголономных систем

Ограничения, выражения для которых включают обобщённые координаты и скорости в виде

$$p_i(q)\dot{q} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, k < n), \quad (2)$$

называют кинематическими связями. Они ограничивают обобщённые скорости, которые могут быть достигнуты при выбранных конфигурациях.

Естественно, что голономные связи также учитывают наличие кинематических связей в виде

$$\frac{\partial f_i}{\partial \dot{q}} \dot{q} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, k). \quad (3)$$

Но не всегда верно обратное, так как может получиться, что кинематические связи невозможно проинтегрировать, т. е. невозможно представить в форме (1). Такие связи называют неголономными. Наличие этих связей приводит к тому, что ограничение подвижности происходит совершенно иначе, чем в случае с голономными связями. Также заметим, что при наличии неголономных связей  $k$  в механической системе с  $n$  обобщёнными координатами, хотя обобщённые скорости ограничены в каждой точке  $(n - k)$ -мерным подпространством, доступность всего пространства конфигураций остаётся неизменной.

Неголономные ограничения возникают при моделировании во многих областях, например в робототехнике (мобильные роботы, космические роботы—манипуляторы и т. д.) или при создании модели транспортных средств (вертолётов, автомобилей, лодок и т. д.). Так как неголономные связи накладывают не только геометрические (голономные), но и кинетические ограничения, такие системы определены на многообразии  $Q = M \times G$ , где  $M$  — пространство форм,  $G$  — групповой компонент. Групповой компонент  $G$  описывает положение и ориентацию в пространстве моделируемого тела, как и в случае голономных связей, в то время как пространство форм  $M$  описывает внутренние переменные (например, направление поворота колёс автомобиля).

Рассмотрим пример неголономной системы в виде катящегося диска (рис. 3).

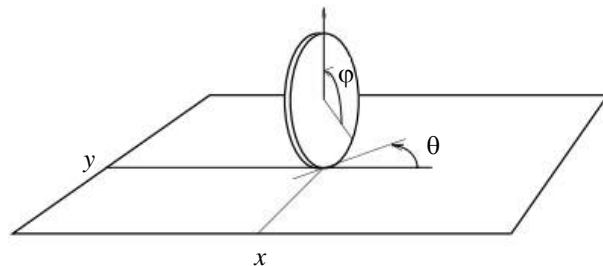


Рис. 3. Катящийся диск



Данный диск катится без скольжения по плоскости. Его конфигурация характеризуется такими переменными, как:

- координаты  $(x, y)$ , которые указывают на точку контакта диска с поверхностью;
- угол  $\theta$ , демонстрирующий направленность относительно оси  $x$ ;
- угол  $\varphi$  между вертикальной осью и выбранной радиальной осью на диске.

Из-за ограничения в виде условия отсутствия скольжения обобщённые скорости системы не могут принимать произвольные значения. В частности, при радиусе диска  $r$  они должны удовлетворять ограничениям

$$\begin{aligned} \dot{x} - r \cos \theta \dot{\varphi} &= 0; \\ \dot{y} - r \sin \theta \dot{\varphi} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

что указывает на необходимость того, чтобы скорость центра диска находилась в средней плоскости диска.

Проинтегрировать данные кинематические условия невозможно. В итоге они не ограничивают возможные конфигурации диска. Чтобы удостовериться в этом, продемонстрируем два простых шага, которые всегда позволят перевести диск из конфигурации  $(x_1, y_1, \theta_1, \varphi_1)$  в конфигурацию  $(x_2, y_2, \theta_2, \varphi_2)$ .

На первом шаге необходимо прокрутить диск до тех пор, пока точка контакта с плоскостью координат  $(x_1, y_1)$  не переместится в координаты  $(x_2, y_2)$ , которые находятся на выбранной кривой длиной

$$r(\varphi_2 - \varphi_1 + 2k\pi), \quad (5)$$

где  $k$  — любое целое неотрицательное число.

Вторым шагом переворачиваем диск вокруг вертикальной оси от угла  $\theta_1$  до угла  $\theta_2$ .

Возможность осуществления данного алгоритма свидетельствует о неголономности ограничений (4), накладываемых на передвижения диска.

### Источники возникновения неголономных связей

Для лучшего понимания проблемы неголономных ограничений рассмотрим возможные источники кинетических связей. Выделим три разных вида источников неголономии, а именно качение без проскальзывания, сохранение углового момента в многотельных системах и специальное управление у робототехнических устройств. Для начала приведём характерные

примеры для первого вида источников неголономии:

- трение качения, возникающее между колёсами и плоскостью при движении колёсных роботов и некоторых категорий транспортных средств;
- ограничения при сложных манипуляциях роботизированной рукой, возникающие из-за скользящего контакта кончиков пальцев с предметами.

Второй вид, которому присущи неголономные связи, возникает в системах с множеством тел, которые не имеют фиксированной структуры. В таких системах сохранение углового момента привносит дифференциальную связь, которая не интегрируема. Примером могут служить:

- роботы-манипуляторы в космических конструкциях;
- спутники с реактивными дисками (маховиками), которые используют для стабилизации траектории;
- прыгающие роботы в фазе полёта.

Третий вид, появляющийся при особой операции управления, применяемой в некоторых робототехнических структурах, может быть продемонстрирован на следующих примерах:

- подводные робототехнические системы, в которых ход вперёд разрешён только по указанному курсу;
- роботы-манипуляторы с одним или рядом пассивных суставов.

Отметим, что в данном случае неголономное поведение обусловлено доступной системой или избранной стратегией работы определённых элементов. Так как иногда кинематические связи невозможно проинтегрировать, необходимо искать иные способы моделирования неголономных систем. Для этого можно использовать метод вариационного интегрирования, который полезен не только в неголономных системах, но также может быть эффективно использован при системе с голономными связями. Рассмотрим принцип его работы и его преимущества.

### Метод вариационного интегрирования

Обычно для моделирования используют вычислительные интеграторы, которые "продвигают" модель механической системы вперёд по времени. Использование данных интеграторов во многих случаях сводится к дискретизации дифференциальных уравнений, с помощью которых можно охарактеризовать траекторию передвижения механической системы. Это приво-

дит к вычислению каждого следующего состояния во времени. Рассмотрим интеграторы, отличие которых состоит в том, что они основаны на идее дискретизации геометрических вариационных принципов. Идея вариационных интеграторов заключается в том, что схема временного шага должна выводиться из вариационного принципа, а не из результирующих дифференциальных уравнений. Главный среди вариационных принципов — принцип Гамильтона, идеей которого является то, что путь  $q_t$  (с конечными точками  $q_0$  и  $q_1$ ), пройденный механической системой, преобразует интеграл действия

$$\int_{t_0}^{t_1} \mathcal{L}(q, \dot{q}) dt, \quad (6)$$

то есть интеграл лагранжиана системы, равный разнице кинетической и потенциальной энергии системы.

На практике вариационные интеграторы, которые берут за основу принцип Гамильтона, сперва аппроксимируют интеграл по времени непрерывного лагранжиана квадратурой, функцией двух идущих подряд состояний  $q_k$  и  $q_{k+1}$  (соответствующих времени  $t_k$  и  $t_{k+1}$ ) вида

$$L(q_k, q_{k+1}) \approx \int_{t_k}^{t_{k+1}} \mathcal{L}[q(t), \dot{q}(t)] dt. \quad (7)$$

Используя данный "дискретный лагранжиан", можно сформулировать дискретный принцип для некоторой траектории  $\{q_0, \dots, q_n\}$ , определяемой последовательными положениями системы в моменты времени  $t_k = kh$ . Этот дискретный принцип требует, чтобы выполнялось тождество

$$\delta \sum_{k=0}^{N-1} L(q_k, q_{k+1}) \equiv 0, \quad (8)$$

где вариации берутся относительно каждого положения  $q_k$  на траектории.

Следовательно, используя  $P_i$  для обозначения частной производной по  $i$ -й переменной, для каждого из трёх положений  $q_{k-1}$ ,  $q_k$ ,  $q_{k+1}$  системы имеем

$$P_2 L(q_{k-1}, q_k) + P_1 L(q_k, q_{k+1}) = 0. \quad (9)$$

Это уравнение лежит в основе структуры интегрирования, высчитывающей  $q_{k+1}$ , применяя два предшествующих значения,  $q_k$  и  $q_{k-1}$ .

Приведём пример. Возьмём непрерывный лагранжиан вида

$$L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M \dot{q} - V(q), \quad (10)$$

где  $V$  — потенциальная функция. Определим дискретный лагранжиан

$$L(q_k, q_{k+1}) = h \mathcal{L}\left(q_{k+1/2}, \frac{q_{k+1} - q_k}{h}\right) \quad (11)$$

и воспользуемся обозначением

$$q_{k+1/2} = \frac{q_k + q_{k+1}}{2}. \quad (12)$$

В результате уравнение будет иметь вид

$$\begin{aligned} M \frac{q_{k+1} - 2q_k + q_{k-1}}{h^2} = \\ = -\frac{1}{2} [\nabla V(q_{k-1/2}) + \nabla V(q_{k+1/2})], \end{aligned} \quad (13)$$

что является дискретным аналогом закона Ньютона:

$$M \ddot{q} = -\nabla V(q). \quad (14)$$

Этот пример очень просто обобщается путём замены  $q_{k+1/2}$  на

$$q_{k+\omega} = (1-\omega)q_k + \omega q_{k+1} \quad (15)$$

как квадратурной точки, которая используется для аппроксимации дискретного лагранжиана.

Может показаться, что использование вариационных интеграторов мотивировано только с математической точки зрения, однако интеграторы, учитывающие вариационные свойства, показывают лучшие результаты, улучшая числовые показатели и предотвращая многие практические проблемы.

Во-первых, вариационные интеграторы достаточно точно сохраняют линейный и угловой моменты, гарантируя хорошее сохранение энергии в течение экспоненциально продолжительного времени моделирования.

Во-вторых, интегралы любой точности могут быть получены обычной корректировкой квадратурных принципов.

В-третьих, вариационные интеграторы сохраняют в целостности симплектическую структуру системы, вследствие чего значительно улучшается обработка затуханий, которая практически не зависит от временного шага.

### Вариационные интеграторы группы Ли

Как уже было указано, все классические интеграторы, включая только что рассмотренные вариационные, в основе своей содержат идею продвижения численного решения вперёд по времени с добавлением к его конфигурации некоторого значения смещения [9—11].

Тем не менее некоторые системы имеют более сложные пространства конфигураций, к примеру абсолютно твёрдые тела, конфигурационное пространство которых представлено группой Ли  $SE(3)$ , именуемой евклидовой группой твёрдых движений. Представитель данной группы, как правило, описан в виде вектора и кодирует матрицу вращения, в то время как группа ( $\in SO(3)$ ) используется для кодировки ориентации. Группа  $SE(3)$ , элементы  $se(3)$  (которые являются бесконечно малыми элементами  $SE(3)$ , т. е. могут быть представлены как моментальные винтовые движения) сопряжённой с ней алгебры Ли и экспоненциальное отображение могут быть продуктивно применены в моделировании.

Говоря условно, интеграторы групп Ли сохраняют инвариантность движения и групповую структуру для систем с конфигурационным пространством группы Ли  $G$ . Алгебра Ли  $g$ , которая связана с пространством  $G$ , имеет своей целью кодирование обобщённой скорости и ускорения (то же самое и для обобщённых импульсов и сил).

Наряду с тем что группы Ли ассоциируются с гладкими многообразиями, связанные с ними алгебры предполагают более простые линейные пространства. Это упрощает интегрирование скорости даже для криволинейного пространства конфигураций. Интеграторы группы Ли нередко выражают изменённую конфигурацию в виде отображения, которое демонстрирует изменение в группе в терминах элементов её в алгебре Ли. Данное отображение называют групповым разностным отображением. Будем обозначать его символом  $\tau$ .

Первые попытки использования отображения для задач интеграции проводили с помощью широко известного экспоненциального отображения. С тех пор было доказано, что с помощью удержания структуры Ли и инвариантов движения при дискретизации можно значительно улучшить численные методы, которые при этом сохраняют верную динамику (даже при длительном интегрировании) и демонстрируют повышенную точность.

Применим ранее использованное обозначение для конфигурационного многообразия:  $Q = M \times G$ ,

где  $G$  — группа Ли (с алгеброй Ли  $g$ ). В случае, например, динамики некоторого транспортного средства (например, траектория движения автомобиля, ограниченная текущим углом поворота передних колёс)  $G = SE(3)$  представляет группу движений твёрдых сочленённых тел, а  $M$  — пространство внутренних переменных этого же транспортного средства.

Отметим, что состояние транспортного средства в данном случае полностью определяется точкой  $q \in Q$  и его скоростью  $\dot{q} \in T_q Q$  ( $T_q Q$  в данном случае является касательным пространством к  $Q$  в точке  $q$ ). Сутью интеграторов групп Ли является то, что необходимо получить уравнение на приведённом пространстве  $TQ \times g$  с помощью уравнения движения из изначального состояния  $TQ$ . Получается это путём перевода  $TQ$  в начало координат и формулировкой его в алгебре  $g$ . Полученное данным путём пространство линейно, поэтому можно использовать стандартные методы интегрирования.

Обратное преобразование к  $\tau$  применяют для отображения кривых в алгебре обратно в группу. Для осуществления этого преобразования для любой группы Ли  $G$  обычно оперируют двумя стандартными типами групповых разностных отображений  $\tau$ :

- экспоненциальное отображение  $\exp: g \rightarrow Q$ , определяемое выражением  $\exp(\xi) = \gamma(1)$  с  $\gamma: R \rightarrow Q$ , является интегральной кривой через тождество векторного поля, связанного с  $\xi \in g$  (следовательно, с  $\dot{\gamma}(0) = \xi$ );

- канонические координаты второго рода  $c\text{csk}: g \rightarrow Q$ ,  $c\text{csk}(\xi) = \exp(\xi^1 e_1) \exp(\xi^2 e_2) \times \dots \times \exp(\xi^n e_n)$ , где  $\{e_i\}$  — базис алгебры Ли.

Продemonстрируем ещё одно отображение  $\tau$ , называемое отображением Кэли, но сразу заметим, что оно справедливо не для каждого случая, а только для ряда матричных групп. Применяется оно для матричных групп, которые используют такие группы жёсткого движения, как  $SO(3)$ ,  $SE(2)$  и  $SE(3)$ :

$$\text{say} : g \rightarrow G, \text{ say} \xi = \left( e - \frac{\xi}{2} \right)^{-1} \left( e + \frac{\xi}{2} \right). \quad (16)$$

Хотя данное отображение даёт только приближение к интегральной кривой, определённой с помощью  $\exp$ , было решено включить её, поскольку она очень проста в исчислении и, таким образом, приводит к более эффективной реализации.

Возможны и другие подходы, например с использованием ретракции и иных бескоммутаторных методов. Авторы данной работы ограничиваются тремя упомянутыми отображениями (рис. 4).

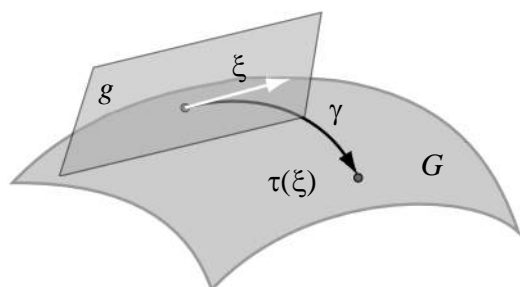


Рис. 4. Пространство группы Ли  $G$

## Заключение

Рассмотрены особенности моделирования динамики движения двух классов механических систем: голономных и неголономных.

С учетом особенностей неголономных систем предложено рассмотреть способы, отличающиеся от методов, подразумевающих решения систем дифференциальных алгебраических уравнений классическими интеграторами.

Рассмотренные методы вариационного интегрирования и интегрирования групп Ли в основе своей предполагают использование вариационных принципов. Они имеют ряд преимуществ перед другими методами. Данные преимущества также описаны.

Дальнейшая работа в рамках этой темы подразумевает более подробное рассмотрение метода вариационного интегрирования и метода групп Ли и дальнейшее построение моделей динамики движения механических систем с помощью полученных знаний.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ланцош К. Вариационные принципы механики. — М.: Мир, 1965. — 408 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: в 10 т. — М.: Физматлит, 1986. — 736 с.
3. Неймарк Ю. И., Фуфаев Н. А. Динамика неголономных систем. — М.: Наука, 1967. — 519 с.
4. Zhilenkov A. A. High productivity numerical computations for gas dynamics modelling based on DFT and approximation: 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). P. 400—403. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317117
5. Sokolov S. S., Zhilenkov A. A., Chernyi S. G., Nyrkov A. P., Mamunts D. G. Dynamics models of synchronized piecewise linear discrete chaotic systems of high order // Symmetry. 2019. V. 11. № 2. P. 236.
6. Марсден Д. Э., Уэст М. Дискретная механика и вариационные интеграторы // Acta Numerica. 2001. P. 357—514.
7. Ivanov A. V., Zhilenkov A. A. The Use of IMU MEMS-Sensors for Designing of Motion Capture System for Control of Robotic Objects: 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). P. 890—893.
8. Бизяев И. А., Борисов А. В., Мамаев И. С. Динамика саней Чаплыгина на цилиндре // Нелинейная динамика. 2016. № 12(4). С. 675—687.
9. Вынгра А. В., Комиссаров Д. Р., Черный С. Г. Физическое моделирование автоматизированной системы управления креном судна // Системы управления и обработки информации. 2020. № 3(50). С. 40—49.
10. Chernyi S. G., Vyngra A. V., Erofeev P., Novak B. P. Analysis of the starting characteristics of the complex maritime systems: Procedia Computer Science. International Conference on Computational Intelligence and Data Science, ICCIDS 2019. 2020. P. 2164—2171.
11. Zhilenkov A. A., Chernyi S. G. Automatic estimation of defects in composite structures as disturbances based on machine learning classifiers oriented mathematical models with uncertainties // J. Information Technologies and Computing Systems. 2020. № 3. С. 13—29.



# **THE PROBLEMS OF MODELING THE DYNAMICS OF MECHANICAL SYSTEMS AND THEIR SOLUTION BY THE METHODS OF THE LIE**

*I. S. Moiseev, A. A. Zhilenkov*

St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

*V. V. Enivatov*

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia

*This article discusses the features of modeling two types of mechanical systems, namely holonomic and nonholonomic systems. Examples of relationships in these systems are also considered. Due to the fact that kinetic connections in nonholonomic systems lead to certain features that distinguish them from holonomic systems, it becomes necessary to search for other methods for modeling the dynamics of nonholonomic systems.*

*Keywords:* holonomic systems, nonholonomic systems, variational integrators, Lie group integrator, modeling.

Bibliography — 11 references.

*Received June 8, 2021*

## ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН В ЛОГИСТИЧЕСКУЮ ЦЕПЬ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

В. В. Кабаков

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

*Рассматривается проблематика блокчейн-технологии в отношении процессов на предприятии, в том числе инструменты работы с блокчейн на примере компании "Chainalysis", которая предоставляет инструменты для блокчейн-анализа для осуществления мониторинга транзакций, оценки рисков и т. д.*

*Ключевые слова:* блокчейн, логистический процесс, информационные технологии, бизнес-процессы.

На современном этапе развития информационных технологий возникает проблема создания новых способов принятия решений в сложно-структурированных задачах. Становится неэффективным использование старых методов и моделей, которые имеют сложные алгоритмы с большим числом параметров, неприменимых к анализу слабоструктурированных проблемных ситуаций (рис. 1). Технология блокчейн служит эффективным средством в подобных ситуациях.



**Рис. 1. Преимущества блокчейн-технологии перед традиционной схемой контроля цепочки поставок**

Автоматизация логистических процессов на предприятиях является актуальной задачей и способствует повышению эффективности работы организации в целом. Однако существует проблема большого объема информации, которую необходимо хранить и обрабатывать. В этом случае используется блокчейн-технология, которая представлена распределенной базой данных,

где информация хранится в виде цепочки блоков [1].

### Ресурсы и операционные способности компании

К примеру, компания обладает конкурентными возможностями и выверенной организационной моделью. Компания продолжает стратегический рост, включающий задействование приобретенных активов, в том числе организация занимается разработкой нефтяных активов, геологоразведочными работами, участвуя в поисках новых месторождений углеводородов на Арктическом шельфе. Однако сложные логистические процессы могут угрожать конкурентоспособности дочернего предприятия [2].

Операционные способности компании включают разработку месторождений на Арктическом шельфе, задействуя месторождения трудноизвлекаемых запасов. Компания развивается в направлении изучения новых способов разработки нетрадиционных запасов углеводородов, включая проекты Дальнего Востока, полуострова Ямал, а также развитие ресурсной базы на территории Восточной Сибири, Ханты-Мансийска, Ямало-Ненецкого АО и Волго-Уральского региона. Следовательно, процесс транспортировки груза является *чрезвычайно сложным*. Операционные способности корпорации включают самые важные параметры, такие, как технологическое превосходство и *выверенная логистическая цепь* [2].

Основная проблема заключается в том, что движение груза на базу хранения в Мурманске с производственного завода в Великом Новгороде нельзя было тщательно проконтролировать. В том числе это обусловлено сложной логистической цепью, участникам которой трудно кон-

**Кабаков Виталий Валериевич**, старший преподаватель кафедры 104.

E-mail: ser-kvv73@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 мая 2021 г.

© Кабаков В. В., 2021

тролировать процесс выгрузки-отгрузки и транспортировки, включая документооборот. Проблема обусловлена тем, что не была разработана унифицированная база данных, которая содержала бы информацию из разнородных источников, где каждый участник мог бы обращаться ко всей информации (включая все транзакции) для лучшего опыта взаимодействия.

### Внедрение технологии блокчейн

Пилотный проект, который использовал технологию блокчейн, осуществил доставку из Морской ледостойкой стационарной платформы "Приразломная" (рис. 2) [3].



Рис. 2. Использование блокчейна в логической схеме

На запорную арматуру была осуществлена установка радиочастотных меток (RFID), а также датчика GPS, чтобы данные о перемещении груза были автоматически записаны в блокчейн.

В том числе были использованы пассивные RFID-метки, которые прошли предварительное опробование на износостойкость к внешним условиям транспортировки [3].

Облачные платформы также расширили область блокчейна в разных сферах деятельности. Многие ключевые решения в сфере логистического процесса теперь задействуют обработку в режиме реального времени, что позволяет участникам принимать решения на основе актуальной информации, полученной в результате анализа.

Метки были считаны на всем пути во время следования груза, включая склады и перевалочные пункты. Собранная информация автоматически передавалась в сеть всем участникам логистического процесса — операторам, экспедиторам, персоналу обслуживания складов и перевалочных пунктов и т. п. [3].

Блокчейн-технологии предлагают пользователям получить возможность изучать различные данные для корректного извлечения и использования информации. К примеру, логистический оператор мог использовать информацию благодаря блокчейн-технологии, полученную в ре-

зультате анализа данных, для улучшения оптимального выбора решений при транспортировке, выявления реальных проблем или будущих угроз, анализа и поиска новых доходов при складировании и отправке груза [4].

Таким образом, были сохранены все данные о скорости перемещения, маршрутах, остановках, а также собраны данные о физических лицах, которые взаимодействовали с метками на складе, чтобы собрать информацию в единую базу.

Блокчейн-технологии связаны с хранилищами данных для получения базовой информации. Хранилище данных объединяет информацию из нескольких источников в одну центральную систему для поддержки актуальных решений, чтобы формировать отчетность для анализа.

Технология позволила автоматизировать все складские операции, чтобы контролировать процесс и временные рамки в установленные заранее сроки, а также выявлять процессы, которые влияли на общий исход.

Все данные о перемещении груза были собраны в едином информационном пространстве, чтобы любой пользователь, который получил доступ в сеть блокчейн, мог собрать копию совершенных записей, а также добавить новые блоки [4].

В итоге логистический процесс стал доступным и прозрачным, ввод данных был автоматизирован, поэтому любые ошибки становились явными и исправимыми. Необходимо также рассмотреть связь блокчейна и "больших данных" для получения синергетического эффекта при возросшем объеме данных при логистических процессах.

Во-первых, поскольку данные генерируются из различных источников с определенными типами данных, важно разработать алгоритмы, которые могут обрабатывать характеристики данных.

Во-вторых, большое количество ресурсов, генерирующих данные в реальном времени, не обходится без проблемы масштаба и скорости [5].

Стремительный рост объемов информации приводит к необходимости ее обработки и последующего хранения. При реализации сложных логистических решений, что связано с большим потоком данных, возникают определенные проблемы, которые включают высокую структурную сложность моделей, нелинейность моделей и рост слабоструктурированных данных. Можно утверждать, что большие данные — это форма нового информационного барьера. В мире обострилась проблема решения задач, связанных с большими данными [5].

Поиск наилучшей модели данных, которая соответствует всем параметрам, является одним из наиболее важных вопросов для распознавания образов и лучшего анализа больших данных. Эти вопросы открыли огромное количество возможностей для расширения новых разработок большого объема, высокой скорости и вариативности, которые требуют экономически эффективных, инно-

вационных форм обработки информации и позволяют улучшить понимание, принятие решений и автоматизацию процессов (рис. 3).

Использование блокчейна наряду с большими данными (Big Data) в оперативной аналитике становится необходимым решением. Повышенный интерес к использованию блокчейна связан с огромным потоком информации (рис. 4).

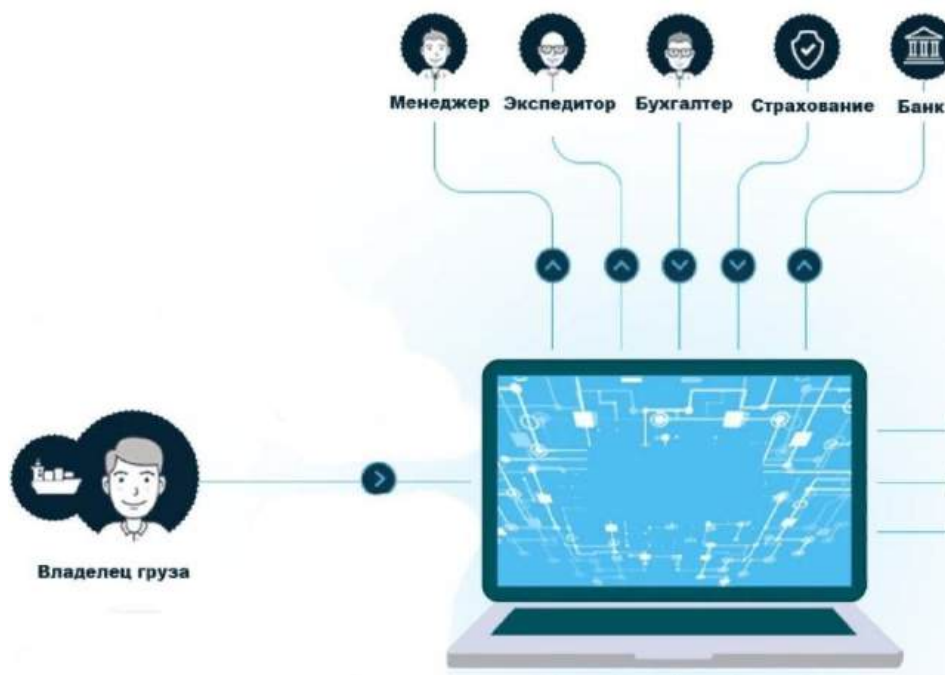


Рис. 3. Процесс управления цепочкой поставок с помощью блокчейна

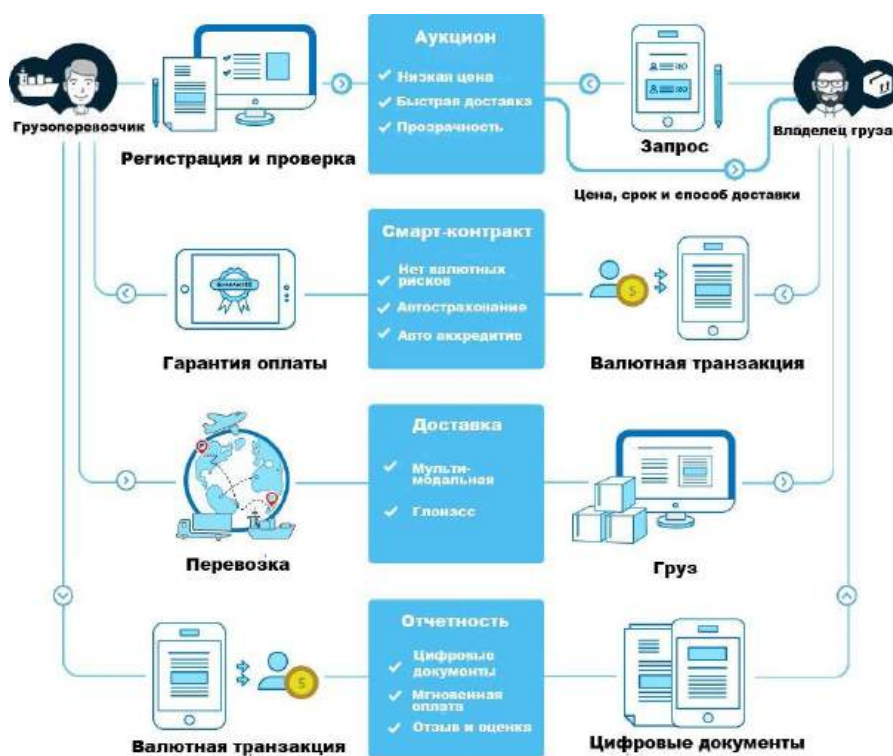


Рис. 4. Схематический процесс движения груза с помощью блокчейн-технологии



Важно отметить, что большие данные представляют собой отчасти слабоструктурированные данные. Пользователям систем все чаще приходится сталкиваться с проблемой обработки и хранения как структурированных, так и слабоструктурированных данных. Слабоструктурированные данные относятся к разновидности гибридных данных, которые могут быть представлены с помощью разных форматов и моделей данных [5].

Стратегическое управление связано с основополагающими качественными изменениями объекта, чтобы затем определить данные объекты на новый уровень. Тактическое управление предусматривает текущее оперативное управление, которое направлено на поддержание объекта управления на соответственном уровне. Таким образом, при логистических задачах, связанных со слабоструктурированными объектами, нужно выбрать определенную стратегию поведения [6].

Зачастую возникают проблемы классификации многомерных объектов, которые описываются совокупностью количественных и качественных признаков. Слабоструктурированные задачи широко представлены в управлении организационно-технических систем. Процесс управления слабоструктурированными задачами должен быть основан на тактическом или стратегическом управлении, которые подвластны блокчейн-технологии.

Таким образом, инструменты блокчейна обрабатывают корпоративные данные и представляют их в удобной для пользователей форме (на примере "Chainalysis"). Инструменты блокчейн-технологии позволяют пользователям получать доступ к различным типам данных: архивным и текущим, внешним и внутренним, а также к преобразованным слабоструктурированным и неструктурированным данным при осуществлении транспортировки груза и т. п. Сотрудники логистической цепи должны анализировать эту информацию, чтобы контролировать весь процесс доставки и транспортировки [7].

Для организации хранения информации чаще всего используют хранилища данных, а для получения доступа к этим данным применяют различные инструменты блокчейна. Количество данных постоянно увеличивается. Из-за больших объемов информация не совсем подходит для принятия решений без определенных средств извлечения и обработки. Средства блокчейна совместно с хранилищами данных предназначены для того, чтобы находить, упорядочивать, предоставлять запрошенную информацию из массивов "больших данных" для принятия конкретного решения.

## Результаты

Информационное общество предъявляет серьезные требования к автоматизированным системам, которые становятся реальным активом, неотъемлемой частью и залогом нормального функционирования организации. В том числе в анализ больших данных для получения синергетического эффекта внедряется блокчейн. Этапы разработки и внедрения автоматизированных информационных систем становятся все более сложной задачей, что связано как с применением современных способов разработки для работы с большими данными, так и с необходимостью соблюдения требований по сохранности и защите информации [8].

Инструменты блокчейна включают процессы переработки данных в доступную информацию и получения корректных данных для принятия решений (информационные технологии сбора и хранения данных, интеграции различных видов информации и обеспечения доступа пользователей к этим данным; информация о всех транзакциях, сформированная в результате анализа и консолидирования информации) [8].

Благодаря использованию интеграции блокчейна и "больших данных" операторы могут управлять интеллектуальной инфраструктурой (например, нефтегазовой организации). Сосредоточив внимание на доступе технических средств, необходимо использовать преимущества новых бизнес-моделей на основе таких технологий, как облачные технологии и автономные корпоративные системы.

## Заключение

С помощью технологии блокчейн реализована целая экосистема, позволяющая взаимодействовать непосредственно всем участникам логистического процесса: производитель, экспедитор, склад, конечный клиент и т. д. (список участников неограничен). Поэтому блокчейн-технологии должны активно внедряться для обеспечения конкурентоспособности предприятий.

В дополнение к насущным проблемам, связанным с развитием технологического сектора, искусственным интеллектом, существует проблема сохранности данных, что обусловлено рисками в сфере кибербезопасности и конфиденциальности данных. Это также повышает необходимость использования блокчейн-технологий [9].

Таким образом, технология блокчейн неразрывно связана с технологиями хранения данных.

В рассмотренной организации была внедрена технология хранения данных, которая определяет методы сбора, хранения, утилизации и интеграции информации, предназначенной для логи-

стического процесса и анализа. Технология инструментов блокчейна определяет методы и средства доступа для анализа информации в соответствующей области.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Заколдаев Д. А., Ямщиков Р. В., Ямщикова Н. В.** Технология блокчейн в России: достижения и проблемы // Вестник МГОУ. 2018. № 2. <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-blokcheyn-v-rossii-dostizheniya-i-problemy>
2. Блокчейн для "Приразломной" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2018-april/1533012/> (дата обращения: 12.04.2021).
3. В "Газпром нефти" испытали блокчейн и Интернет вещей в логистике [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/news/v-gazprom-nefti-ispytali-blokcheyn-i-internet-veshchey-v-logistike/> (дата обращения: 11.04.2021).
4. **Choi T.-M., Luo S.** Data quality challenges for sustainable fashion supply chain operations in emerging markets: Roles of blockchain, government sponsors and environment taxes // Trans. Res. P. E. 2019. № 131. P. 14.
5. **Кирилова Д. А., Маслов Н. С., Рейн А. Д.** Blockchain, как новая технология для разработки // International J. Open Information Technologies. 2019. № 1. С. 34—38.
6. **Лысенко Ю. В., Лысенко М. В., Гарипов Р. И.** Блокчейн в логистике // АНИ: экономика и управление. 2019. № 3(28). <https://cyberleninka.ru/article/n/blokcheyn-v-logistike>
7. **Tijjan E., Aksentijevic S., Ivanić K., Jardas M.** Blockchain technology implementation in logistics // Sustainability. 2019. № 11. P. 1185.
8. **Weking J., Mandalenakis M., Hein A., Hermes S., Bohm M., Krcmar H.** The impact of blockchain technology on business models — A taxonomy and archetypal patterns // Electr. Markets. 2020. № 30. P. 285—305.
9. **Vaio A. D., Varriale L.** Blockchain technology in supply chain management for sustainable performance: Evidence from the airport industry // Int. J. Inf. Manag. 2020. № 52. P. 102014.

## IMPLEMENTATION OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY IN THE LOGISTICS CHAIN OF MATERIAL AND TECHNICAL RESOURCES

*V. V. Kabakov*

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*The work examines the problem of "blockchain" technology in relation to the processes at the enterprise in the modern world. Including tools for working with blockchain on the example of the company "Chainalysis", which provides tools for blockchain analysis to monitor transactions, assess risks, etc.*

**Keywords:** blockchain, logistics process, information technology, business processes.

**Bibliography** — 9 references.

*Received May 16, 2021*

УДК 622.24.082.2

DOI: 10.52190/1729-6552\_2021\_3\_21

## ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ПРОХОДКИ

**М. Н. Дадашев**, д-р техн. наук

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина,  
Москва, Россия

**Р. Ф. Джафаров; Г. Ю. Куропаткин**

Газпром ЭП Интернэшнл Б.В., Санкт-Петербург, Россия

*Рассмотрены существующие ключевые модели расчета и прогнозирования механической скорости проходки. Выявлены основные недостатки традиционных методов. Проведен сравнительный анализ традиционных методов с решениями на основе алгоритмов машинного обучения. Продемонстрированы основные преимущества предлагаемого подхода.*

**Ключевые слова:** механическая скорость проходки, машинное обучение, оптимизация МСП, выбор параметров режима бурения, WITSML, сенсорные данные, модели расчета.

Механическая скорость проходки (МСП) является одним из ключевых показателей, влияющих на время строительства скважины, сопутствующие риски, а соответственно, и на итоговую стоимость строительства наряду с капитальными затратами, что особенно актуально при разработке месторождений. Среди прочего МСП напрямую зависит от типа долота, выбранной компоновки нижней части бурильной колонны (КНБК), прочности разбуриваемой породы, нагрузки на долото, частоты оборотов долота, а также подачи и характеристик бурового раствора. Для учета влияния указанных факторов и максимизации МСП разработаны различные математические модели. Однако каждая из них имеет свои определенные недостатки, которые могут быть устранены за счет внедрения элементов машинного обучения. Рассмотрим наиболее распространенные, традиционные в индустрии

модели и проведем сравнительный анализ с алгоритмами машинного обучения.

### Математические модели

Начиная с середины 1960-х годов предлагались различные модели расчета скорости проходки. Для понимания истории развития подходов к решению данной проблемы остановимся лишь на некоторых из них.

Одна из первых моделей была предложена Бингамом в 1965 г. [1]. Соответствующее уравнение зависимости МСП от параметров режима бурения выглядит следующим образом:

$$ROP = a \left( \frac{WOB}{d_b} \right)^b RPM^c, \quad (1)$$

где ROP — механическая скорость проходки;  
a, b, c — эмпирические коэффициенты;  
 $d_b$  — диаметр долота;  
WOB — нагрузка на долото;  
RPM — частота оборотов ВСП.

Одним из недостатков модели является то, что она не учитывает прочность разбуриваемых пород, расход и характеристики бурового раствора. Кроме того, значения эмпирических параметров зависят от типа горной породы, долота, раствора и т. д., что в промышленных условиях оценить крайне сложно.

**Дадашев Мирали Нуралиевич**, профессор кафедры физической и коллоидной химии.

E-mail: jnus@mail.ru

**Джафаров Ренат Фархатович**, специалист отдела технологии строительства скважин.

E-mail: jnus@mail.ru

**Куропаткин Григорий Юрьевич**, начальник отдела технологии строительства скважин.

E-mail: jnus@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2021 г.

© Дадашев М. Н., Джафаров Р. Ф.,  
Куропаткин Г. Ю., 2021

В 1974 г. Бургойном и Юнгом была предложена более усовершенствованная модель расчета МСП [2]:

$$ROP = e^{a_1 + \sum_{j=2}^8 a_j x_j}, \quad (2)$$

где ROP — механическая скорость проходки;  
 $e$  — пластичность горной породы;  
 $x_j$  — параметры, учитывающие прочность породы, её уплотнение, репрессию на пласт, диаметр и частоту оборотов долота, нагрузку на долото, износ вооружения, а также гидравлику долота в модели Бургойна;  
 $a_j$  — эмпирические коэффициенты в модели Бургойна.

Основными недостатками данной модели расчета являются присутствие в уравнениях большого количества эмпирических коэффициентов (кроме указанных констант, имеется ряд дополнительных, которые необходимы для расчета  $x_j$ -параметров), а также необходимость наличия подробной литологической информации. Определение скорости проходки осложняется при частой смене пород.

Кроме того, в промышленных условиях практически невозможна количественная оценка степени износа долота, которая входит в модель в качестве параметра  $x_7$ .

Модель процесса бурения для трехшарошечных долот при идеальном качестве очистки ствола скважины предложена в 1987 г. Варреном Т. М. Она представлена следующим уравнением [3]:

$$ROP = \left[ \frac{aS^2d_b^2}{RPM^b \cdot WOB^2} + \frac{c}{RPM \cdot d_b} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где  $a, b, c$  — эмпирические коэффициенты;  
 $S$  — предел прочности горной породы на сжатие с ограничивающим давлением;  
 $d_b$  — диаметр долота;  
WOB — нагрузка на долото;  
RPM — частота оборотов ВСП.

Данная модель плохо прогнозировала скорость проходки при неидеальном качестве очистки ствола скважины. В связи с этим в дальнейшем она была доработана [3]:

$$ROP = \left[ \frac{aS^2d_b^2}{RPM \cdot WOB^2} + \frac{b}{RPM \cdot d_b} + \frac{cd_b\rho\mu}{F_{jm}} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность бурового раствора, г/см<sup>3</sup>;  
 $\mu$  — пластическая вязкость бурового раствора, г/см<sup>3</sup>;  
 $F_{jm}$  — гидромониторный эффект, кфунт.

Эта модель Варрена, как оказалось, плохо работала при бурении мягких горных пород, а также при бурении на депрессии. В том же году Варрен совместно с другими авторами доработал модель с учетом дополнительного коэффициента  $d$ , обусловленного типом долота, и пластичности горной породы [4]:

$$ROP = \left[ \frac{Sd_b^2}{RPM \cdot WOB} \left( \frac{aSd_b e}{WOB} + \frac{d}{e} \right) + \frac{b}{RPM \cdot d_b} + \frac{cd_b\rho\mu}{F_{jm}} \right]^{-1}, \quad (5)$$

где  $d$  — смещение осей шарошек долота;  
 $e$  — пластичность горной породы.

Однако, как отмечают Харланд Г., Хоберок Л., параметр  $d$ , представляющий собой смещение осей шарошек долота и измеряющийся в м<sup>-1</sup>, крайне сложно измерить. Как правило, его выбирают так, чтобы соответствие скорости проходки лабораторным данным было наилучшим. Более того, пластичность  $e$  трудно определяется даже в лабораторных условиях, а в реальных условиях зависит ещё и от таких факторов, как дифференциальное давление на забое, температура и скорость деформации породы. При этом влияние последних абсолютно не учитывается [5].

Описанные модели (за исключением модели Бургойна) не учитывают влияния глубины и особенностей траектории бурения. В частности, авторы отмечают, что ни одна из моделей не учитывает эффекта удержания шлама на забое. Иными словами, недостаточно учета влияния качества очистки ствола скважины. Необходимо брать в расчет упрочнение породы, в частности при увеличении плотности бурового раствора (БР). На этом явлении основан эффект повышения стабильности стенок ствола скважины, а также резкого увеличения скорости проходки при газонефтеводопроявлениях (за счет снижения плотности БР). Этим также объясняется увеличение средней скорости проходки при бурении с управляемым давлением за счет бурения при давлении, близком к пластовому, и при бурении на репрессии.

Харланд Г. и Хоберок Л. попытались решить данную проблему, включив в исходное уравнение функцию, характеризующую удержание шлама [5]:

$$ROP = \left[ f_c(P_e) \left( \frac{aS^2d_b^3}{WOB^2 \cdot RPM} + \frac{b}{RPM \cdot d_b} \right) + \frac{cd_b\rho\mu}{F_{jm}} \right]^{-1}. \quad (6)$$



Функция удержания шлама  $f_c(P_e)$  вычисляется согласно уравнению

$$f_c(P_e) = c_c + a_c(P_e - 120)^{b_c}, \quad (7)$$

где  $c_c, a_c, b_c$  — константы, зависящие от литологии в модели Хареланда и Хоброка;

$P_e$  — величина репрессии на пласт.

Для расчета скорости проходки и оптимизации параметров режима бурения в случае применения винтовых забойных двигателей (ВЗД) и PDC-долот Мотаххари Х. Р., Харландом Г. и Джеймсом Дж. в 2010 г. была предложена следующая модель [6]:

$$ROP = W_f \left( \frac{G \cdot RPM_t^\gamma \cdot WOB^\alpha}{d_b S} \right), \quad (8)$$

где  $\gamma, \alpha$  — эмпирические коэффициенты в модели Мотаххари;

$RPM_t$  — суммарная частота оборотов долота (ВСП + ВЗД, где ВСП — верхний силовой привод);

$G$  — коэффициент, зависящий от геометрии долота, размеров и конфигурации вооружения, а также от коэффициента трения долото—порода;

$W_f$  — безразмерная величина, характеризующая износ долота, которая вычисляется по формуле

$$W_f = k_{wf} \left( \frac{WOB}{N_C} \right)^p \frac{1}{S^\tau \cdot A_w^{p+1}}, \quad (9)$$

где  $k_{wf}$  — безразмерная константа функции износа;

$N_C$  — количество зубцов на поверхности долота;

$A_w$  — площадь поверхности износа вооружения;

$\tau, p$  — безразмерные показатели функции износа.

Предел прочности на сжатие  $S$  в указанной формуле зависит от ограничивающего давления  $P_e$ , что равно репрессии на пласт и прочности на одноосное сжатие:

$$S = S_0 (1 - a_s P_e^{b_s}), \quad (10)$$

где  $a_s, b_s$  — параметры, зависящие от литологии в модели Мотаххари;

$S_0$  — прочность горной породы на одноосное сжатие.

Площадь поверхности износа  $A_w$  оценивается исходя из глубины и объема истирания вооружения долота. В свою очередь, последнее является функцией параметров режима бурения, конфигурации долота и характеристик горной породы:

$$V_{eq} = C_a \sum_{d=d_{in}}^{d_{out}} \left( \frac{WOB}{1000 N_C} \right)^{C_1} RPM_t^{C_2} \left( \frac{S}{1000} \right) Abr, \quad (11)$$

где  $V_{eq}$  — объем истирания вооружения долота;

$C_a$  — коэффициент износа долота, зависящий от прочностных характеристик вооружения долота;

$S$  — предел прочности горной породы на сжатие с ограничивающим давлением;

$C_1, C_2$  — эмпирические коэффициенты в модели Мотаххари;

$Abr$  — абразивность породы.

### Оптимизация удельной механической энергии

Стоит отметить ещё один метод оптимизации скорости проходки, который нередко применяют на практике. Данный метод впервые был предложен Теале в 1965 г. [7]. Суть метода заключается в минимизации удельной механической энергии MSE, что ведет к уменьшению излишних потерь на трение и достижению оптимальной скорости проходки. Эксперименты Теале показали, что минимальное значение MSE примерно равно прочности породы. Данный факт лежит в основе оптимизации режима бурения. Прочности пород в разрезе служат пороговыми значениями. Цель оптимизации — подобрать параметры режима бурения, в частности нагрузку на долото и частоту оборотов, таким образом, чтобы расчетный показатель MSE был максимально близок пороговому значению. Удельная механическая энергия рассчитывается по следующей формуле:

$$MSE = \frac{WOB}{A_b} + \frac{120 \pi \cdot RPM \cdot T}{A_b \cdot ROP}, \quad (12)$$

где  $T$  — крутящий момент на долоте;

$A_b$  — площадь долота  $\left( A_b = \frac{\pi d_b^2}{4} \right)$ .

Позже формула (12) была преобразована с учетом фактора эффективности [8]:

$$MSE = E_m \left( \frac{WOB}{A_b} + \frac{120 \pi \cdot RPM \cdot T}{A_b \cdot ROP} \right), \quad (13)$$

где  $E_m$  — фактор эффективности долота.

Считается, что значение  $E_m$  зависит от пиковой эффективности долота. Ввиду того что эффективность долота зависит от большого количества факторов, диапазон значений  $E_m$  может сильно варьироваться [8—11].

На практике, как правило, для определения порогового значения проводят исследование режима бурения. Дальнейший мониторинг состоит в поддержании фактических значений MSE максимально близкими к определенному ранее порогу.

### **Недостатки традиционных моделей и перспективы внедрения элементов машинного обучения**

Наличие множества различных моделей говорит о том, что вопрос определения скорости проходки не является тривиальным и зависит от множества факторов, таких, как тип и конфигурация долота, тип и параметры бурового раствора, литология и т. д. Для учета указанных факторов необходимо принять во внимание ряд корректировочных эмпирических коэффициентов, которые определяются с помощью статистических методов. С учетом того, что алгоритмы машинного обучения представляют собой набор статистических инструментов, целесообразность их применения становится очевидной.

При смене породы в процессе бурения обязательным является обновление не только эмпирических показателей, но и значения прочности породы. Особенно сложным это становится при бурении интервалов с перемежающимися либо смешанными пропластками.

В указанном случае проблемы с определением порогового значения появляются также и при мониторинге удельной механической энергии. Применение ряда алгоритмов машинного обучения, в частности основанных на решающих деревьях, дает возможность избежать необходимости определения не только эмпирических коэффициентов, но и прочности, и абразивности пород, т. к. все эти параметры алгоритмы способны косвенно оценить, исходя из сенсорных данных, получаемых по протоколам WITS и WITSML. Подобная возможность значительно облегчает вопрос оптимизации скорости проходки на практике.

Большой сложностью для всех описанных моделей является учет влияния износа долота. Несмотря на то что предложены различные варианты решения данной проблемы, практическое применение этих моделей крайне затрудне-

но ввиду непростой оценки соответствующих параметров, входящих в модель.

Элементы машинного обучения, являясь статистическим инструментом, позволяют избежать необходимости определения не только эмпирических коэффициентов, обусловленных литологией и типом долота, но и ряда параметров, которые в промышленных условиях невозможно оценить, в частности для учета степени износа вооружения долота. Данная проблема решается за счет формирования выборки данных по секциям скважин, принадлежащих одному кусту либо блоку, на которых применялись одинаковые долота.

Чен, Ян и Дель [12] отмечают, что методология оптимизации удельной механической энергии не позволяет оценить точку основания. Точкой основания называется максимальная нагрузка на долото, выше которой скорость проходки начинает уменьшаться при прочих равных условиях. Однако невозможность оценки точки основания имеет место также и в отношении остальных моделей. На конференции RDCR-2020 авторами было продемонстрировано, что алгоритмы машинного обучения позволяют решить данную проблему.

### **Заключение**

Традиционные методы расчета и оптимизации скорости проходки обладают рядом недостатков, в силу чего их практическое применение сильно ограничено. При наличии большого количества неопределенностей и факторов, которые зачастую крайне сложно учесть, применение элементов машинного обучения позволяет косвенно оценить их совокупное влияние и с большой точностью прогнозировать механическую скорость проходки, благодаря чему возможны оптимальный подбор параметров режима бурения и достижение максимально возможных значений скоростных показателей проводки скважины.

Исследования в области применения искусственного интеллекта в бурении активно ведутся как за рубежом [13, 14], так и российскими учеными [15]. Однако вопрос "умной" оптимизации скорости проходки в отечественной литературе упоминается крайне редко.

Учитывая тот факт, что алгоритмы машинного обучения основаны на статистической обработке получаемых данных, внедрение их элементов становится незаменимой и наиболее эффективной альтернативой.

# ЛИТЕРАТУРА

1. **Batruny P., Yahya H., Kadir N., Omar A., Zakaria Z., Batamale S., Jayah N.** (2019). Drilling in the Digital Age: An Approach to Optimizing ROP Using Machine Learning: Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. DOI:10.2118/197157-ms.
2. **Bourgoyne A. T., Young F. S.** A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection // Society of Petroleum Engineers J. 1974. № 14(04). P. 371—384. DOI:10.2118/4238-pa.
3. **Enamul Hossain M.** (2017). Fundamentals of Drilling Engineering: Multiple Choice Questions and Workout Examples for Beginners and Engineers. Scrivener Publishing LLC. Published 2017 by John Wiley & Sons, Inc.
4. **Winters W. J., Warren T. M., Onyia E. C.** (1987). Roller Bit Model with Rock Ductility and Cone Offset: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. DOI:10.2118/16696-ms.
5. **Hareland G., Hoberock L. L.** (1993). Use of Drilling Parameters To Predict In-Situ Stress Bounds: Proceedings of SPE/IADC Drilling Conference. DOI:10.2523/25727-ms.
6. **Motahhari H. R., Hareland G., James J. A.** Improved Drilling Efficiency Technique Using Integrated PDM and PDC Bit Parameters // J. Canadian Petroleum Technology. 2010. № 49(10). P. 45—52. DOI:10.2118/141651-pa.
7. **Teale R.** The concept of specific energy in rock drilling // International J. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1965. № 2(2). P. 245. DOI:10.1016/0148-9062(65)90016-1.
8. **Dupriest F., Koederitz W.** (2005). Maximizing Drill Rates with Real-Time Surveillance of Mechanical Specific Energy: Proceedings of SPE/IADC Drilling Conference. DOI:10.2523/92194-ms.
9. **Hammoutene C.** (2012). FEA Modeled MSE/UCS Values Optimize PDC Design for Entire Hole Section: North Africa Technical Conference and Exhibition. DOI:10.2118/149372-ms.
10. **Kingsley A., Ibiye I.** Application of mechanical specific energy techniques in reducing drilling cost in deepwater development: SPE Deepwater Drilling and Completions Conference, 20—21 June, 2012. Galveston, Texas, USA. DOI: 10.2118/156370-MS.
11. **Amadi W. K., Iyalla I.** (2012). Application of Mechanical Specific Energy Techniques in Reducing Drilling Cost in Deepwater Development: SPE Deepwater Drilling and Completions Conference. DOI:10.2118/156370-ms.
12. **Xuyue Chen, Jin Yang, Deli Gao** (2018). Drilling Performance Optimization Based on Mechanical Specific Energy Technologies, Drilling, AriffinSamsuri, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.75827.
13. **Han J., Sun Y., Zhang S.** (2019). A Data Driven Approach of ROP Prediction and Drilling Performance Estimation: International Petroleum Technology Conference. DOI:10.2523/19430-ms.
14. **Hegde C., Soares C., Gray K. E.** (2018). Rate of Penetration (ROP) Modeling Using Hybrid Models: Deterministic and Machine Learning: Proceedings of the 6th Unconventional Resources Technology Conference. DOI:10.15530/urtec-2018-2896522.
15. **Antipova K., Klyuchnikov N., Zaytsev A., Gurina E., Romanenkova E., Koroteev D.** (2019). Data-Driven Model for the Drilling Accidents Prediction: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. DOI:10.2118/195888-ms.

## PROSPECTS FOR THE INTRODUCTION OF MACHINE LEARNING ELEMENTS TO INCREASE THE MECHANICAL SPEED OF PENETRATION

*M. N. Dadashev*

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia

*R. F. Dzhafarov, G. Yu. Kuropatkin*

Gazprom EP International B.V., St. Petersburg, Russia

*The existing key models for calculating and predicting ROP have been analyzed. The main disadvantages of traditional methods are revealed. A comparative analysis with solutions based on machine learning algorithms is carried out, and the main advantages of the proposed approach are demonstrated.*

*Keywords:* rate of penetration (ROP), machine learning, ROP optimization, drilling parameters selection, WITSML, sensor data, calculation models.

Bibliography — 15 references.

*Received April 13, 2021*

УДК 681.3.06

DOI: 10.52190/1729-6552\_2021\_3\_26

## **ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ТРУДОЁМКОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АППАРАТУРЫ ВООРУЖЕНИЯ, ВОЕННОЙ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

*Д. В. Уланов*

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

*Рассмотрены отдельные аспекты нормативного правового регулирования ценообразования в сфере государственного оборонного заказа. Обоснована актуальность методического обеспечения деятельности организации приборостроительной отрасли в части определения трудоемкости проектирования аппаратуры вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) в приборостроительной отрасли. Приведен концептуальный подход к оценке трудоемкости проектирования аппаратуры ВВСТ.*

*Ключевые слова:* оценка, нормирование, военная техника, нормативы, трудоемкость, аппаратура, государственный оборонный заказ, военные представительства, национальная безопасность и обороноспособность.

Процесс наращивания боевого потенциала ведущих мировых держав, гонка вооружений в значительной степени трансформировалась в соревнование по совершенствованию и развитию военных технологий. Стимуляция инновационных процессов в создании вооружений становится важным элементом как развития предприятий оборонно-промышленного комплекса, военной науки, так и создания научно-технического задела на годы вперед для достижения устойчивого развития экономики страны и обеспечения национальной безопасности. Структура военных расходов Российской Федерации включает значительные бюджетные ассигнования на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок (НИОКР), в том числе работ по созданию новых образцов ВВСТ. При формировании государственной программы вооружения (ГПВ) и государственного оборонного заказа (ГОЗ) Государственный заказчик сталкивается с необходимостью определения сроков поставки и стоимостных характеристик ВВСТ.

На ранних стадиях проектирования, этапе планирования закупок возникает необходимость определения цен и сроков выполнения контрактов на поставку ВВСТ, зачастую в условиях ограниченного объема финансового обеспечения

и неопределенности исходных технических данных о создаваемом изделии.

Аналогичная задача возникает у руководителей предприятий промышленности на этапе принятия управленческих решений по определению возможности участия в конкурентных процедурах по выбору поставщика ВВСТ, проводимых Государственным заказчиком. Серьезным ограничивающим фактором при этом является отсутствие специалистов необходимой квалификации, достаточного объема фонда рабочего времени, позволяющего выполнить государственный контракт в предусмотренный Государственным заказчиком срок, и возможности предложить конкурентную цену поставляемой продукции.

Важной проблемой, возникающей при решении задач по определению фонда рабочего времени, необходимого для выполнения предусмотренных государственным контрактом работ, и затрат на оплату труда, относимых на себестоимость продукции военного назначения, является отсутствие единого методического аппарата определения трудоемкости работ по созданию ВВСТ в ряде отраслей промышленности. Особенно остро данный вопрос встает при определении плановых трудозатрат на создание аппаратуры ВВСТ в приборостроительной отрасли.

Цель данной работы — обоснование необходимости разработки отраслевой методики определения трудоемкости работ по созданию аппаратуры ВВСТ в приборостроительной отрасли и обзор концептуального подхода к оценке трудоемкости проектирования аппаратуры ВВСТ, ко-

---

Уланов Дмитрий Витальевич, преподаватель.  
E-mail: ylanovdv@gmail.com

Статья поступила в редакцию 27 мая 2021 г.

© Уланов Д. В., 2021

торый может быть взят за основу при разработке указанной методики.

### **Отдельные аспекты нормативного правового регулирования ценообразования в сфере выполнения государственного оборонного заказа**

Положения Федерального закона "О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд" от 05.04.2013 № 44-ФЗ регулируют отношения, направленные на обеспечение государственных нужд, в целях повышения эффективности, результативности осуществления закупок товаров, работ, услуг, обеспечения гласности и прозрачности осуществления таких закупок, предотвращения коррупции и других злоупотреблений в сфере таких закупок в части, касающейся:

- планирования закупок товаров, работ, услуг;
- определения поставщиков (подрядчиков, исполнителей);
- заключения гражданско-правового договора;
- особенностей исполнения контрактов;
- мониторинга закупок товаров, работ, услуг;
- аудита в сфере закупок товаров, работ, услуг;
- контроля за соблюдением законодательства Российской Федерации и иных нормативных правовых актов о контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд (далее — контроль в сфере закупок) [1].

На этапе планирования закупок возникает необходимость определения цены контракта на поставку ВВСТ в условиях ограниченного объема финансового обеспечения. Аналогичная проблема решается Государственным заказчиком при определении начальной максимальной цены контракта в случае конкурентного способа определения поставщика ВВСТ. Статья 22 Федерального закона "О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд" предусматривает применение одного или нескольких из следующих методов:

- сопоставимых рыночных цен (анализа рынка);
- нормативный;
- тарифный;
- проектно-сметный;
- затратный.

"Положение о государственном регулировании цен на продукцию, поставляемую по государственному оборонному заказу", утвержденное

Постановлением Правительства РФ от 02.12.2017 № 1465, уточняет требования № 44-ФЗ от 05.04.2013 и устанавливает следующие методы определения цены на продукцию, поставляемую по ГОЗ:

- анализа рыночных индикаторов;
- сравнимой цены;
- затратный;
- индексации базовой цены;
- индексации по статьям затрат (не применяется для определения цен НИОКР).

Методы определения цены базируются на приоритете использования информации о рыночных ценах на продукцию. При определении цены на продукцию, которая обращается на конкурентном рынке, должны применяться рыночные методы формирования стоимости: метод анализа рыночных индикаторов и метод сравнимой цены. Сущность первого метода состоит в установлении цены на продукцию на уровне, не превышающем цену на эту продукцию, сложившуюся на бирже либо определенную в соответствии с данными официальной статистической информации. Второй метод используется в случае неприменимости метода анализа рыночных индикаторов при условии обращения на соответствующем рынке товаров, работ, услуг сравнимой продукции, либо если уполномоченными государственными или муниципальными органами утверждены в установленном порядке соответствующие тарифы (цены) на рассматриваемую продукцию. Этот метод заключается в установлении цены на продукцию, не превышающей цену на сравнимую продукцию, сложившуюся на соответствующем товарном рынке (рыночную цену) [2].

Приоритет методов определения экономически обоснованного уровня цены продукции по ГОЗ в зависимости от видов такой продукции — новшество законодательства о ГОЗ. Ранее государственное регулирование цен в сфере ГОЗ предполагало использование преимущественно затратного метода определения стоимости продукции, поставляемой по ГОЗ, а метод предельного уровня цен и аналоговый метод являлись по своей сути производными по отношению к затратному методу. Тем не менее при заказе наукоёмкой продукции и, прежде всего, определении цены НИР, ОКР по созданию изделий вооружения, военной и специальной техники затратный метод определения стоимости остаётся основным для Государственного заказчика.

При применении затратного метода цена на продукцию определяется как цена единицы продукции, формируемая исходя из определенного в установленном порядке состава затрат, вклю-



чаемых в себестоимость продукции, в виде суммы величин указанных затрат и прибыли.

Себестоимость продукции формируется в виде суммы затрат, состав и размеры которых определяются исходя из:

- особенностей поставки (в том числе производства) продукции, выполнения научно-исследовательских и (или) опытно-конструкторских и иных работ, оказания услуг, установленных нормативно-технической документацией, техническими заданиями и иными документами;

- учетной политики и решений организации, которыми определяется специфика учета и планирования затрат;

- обоснованных экономических показателей по статьям затрат, включаемых в себестоимость, в том числе:

- для материальных расходов — номенклатура сырья, материалов, иных материальных ресурсов, нормы их расхода и цена единицы ресурса;

- для оплаты труда — трудоемкость изготовления (разработки) продукции, стоимость единицы труда (нормо-часа, человеко-часа, человеко-дня, человеко-месяца);

- обоснованные головным исполнителем (исполнителем) нормативы для отнесения отдельных затрат организации на себестоимость продукции, в том числе уровень общепроизводственных, общехозяйственных, транспортно-заготовительных расходов, специальных затрат и (или) затрат на подготовку и освоение производства.

Порядок определения состава затрат, включаемых в цену продукции, поставляемой в рамках государственного оборонного заказа, утверждён приказом Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 8.02.2019 № 334 [3].

Указанный Порядок также применяется при определении состава фактических затрат на производство и реализацию продукции. Учет фактических затрат осуществляется в соответствии с Правилами ведения организациями, выполняющими государственный оборонный заказ, раздельного учета результатов финансово-хозяйственной деятельности, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 19.01.1998 № 47.

В состав прямых затрат включаются затраты по следующим статьям калькуляции:

- материальные затраты;
- затраты на оплату труда;
- страховые взносы на обязательное социальное страхование;
- затраты на подготовку и освоение производства;

- затраты на специальную технологическую оснастку;

- специальные затраты;

- затраты на командировки;

- прочие прямые затраты;

- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;

- затраты по работам (услугам), выполняемым (оказываемым) сторонними организациями.

В составе прямых затрат особый интерес представляют затраты на оплату труда, являющиеся производными от технологической трудоемкости. В соответствии с данными официальной статистики [4] доля затрат на оплату труда при проведении научных исследований и разработок в РФ в 2019 г. составила 47,34 %.

Для качественного определения затрат на оплату труда должны использоваться соответствующие модели и методы определения трудоемкости разработки продукции военного назначения, учитывающие особенности проектирования конкретных типов продукции и специфику отрасли.

#### **Краткий обзор методов определения трудоемкости, применяемых в приборостроительной отрасли**

Основу методики определения плановой трудоемкости работ по проектированию аппаратуры в приборостроительной отрасли и оценки фактических трудозатрат составляют соответствующие методы определения трудоемкости. Наиболее распространенными методами определения трудоемкости проектирования аппаратуры являются расчётные методы и разновидность измерительного метода — хронометраж [5].

*Метод учета масс.* Достаточно простым методом определения трудоемкости на всех стадиях разработки конструкторской документации является метод учета масс, который базируется на предположении, что значения показателей трудоемкости  $T$  разработки конструкторской документации изделия в значительной мере зависят от массы изделия. Соответственно значения  $T$  существенно изменяются при изменении массы:

$$T = T_{ан} K_m,$$

где  $T_{ан}$  — трудоемкость изделия, которое является аналогом проектируемого, или трудоемкость, полученная статистическим методом для изделий, которые имеют общие конструктивные или технологические признаки с данным изделием;

$K_M$  — коэффициент, который учитывает разницу размеров или массы сравниваемых конструкций

Для деталей простой формы, а также для геометрически подобных изделий коэффициент  $K_M$  определяется по упрощенной формуле:

$$K_M = M_{из}/M_{ан} = S_{из}/S_{ан},$$

где  $M_{из}$  — масса изделия;

$M_{ан}$  — масса аналога;

$S_{из}$  и  $S_{ан}$  — площади их обрабатываемых поверхностей.

**Метод учёта сложности конструкции изделия.** Данный метод используется на стадиях разработки технического проекта, рабочей конструкторской документации и базируется на положении о том, что изменение трудоемкости пропорционально усложнению конструкции изделия по сравнению с изделием-аналогом. Для изделий одной типовой группы причинами усложнения могут быть увеличение параметров изделия, повышение технических требований к конструкции.

Трудоемкость изделия определяется по формуле

$$T = T_{ан} K_{слож},$$

где  $T_{ан}$  — трудоемкость аналога;

$K_{слож}$  — коэффициент сложности конструкции.

**Метод факторного анализа.** В соответствии с данным методом трудоемкость проектируемого изделия  $T$  (нормо-час) определяется зависимостью

$$T = T_{баз} K_0,$$

где  $T_{баз}$  — исходный показатель трудоемкости изделия базовой (характерной) конструкции в определенных условиях выполнения работ;

$K_0$  — коэффициент, который учитывает влияние конкретных условий выполнения работ.

**Метод удельного нормирования.** Этот метод является относительно простым и удобным. Он используется на всех стадиях разработки конструкторской документации.

Основной характеристикой при использовании этого метода является удельный норматив — удельная трудоемкость изделия, определяемая как отношение трудоемкости изделия в изготовлении (ремонте) к номинальному значению трудоемкости или к полезному эффекту, который получают при использовании изделия по назначению.

Трудоемкость нового изделия определяют по формуле

$$T = T_{уд} P,$$

где  $T_{уд}$  — удельная трудоемкость аналога;

$P$  — значение главного технического параметра изделия или полезный эффект, который реализуется при его использовании по назначению.

**Измерительный метод. Хронометраж.** На предприятиях приборостроительной отрасли наибольшее распространение получили методы определения трудоемкости, в основе которых лежит хронометраж. Хронометраж представляет собой метод изучения расходов рабочего времени на выполнение работ путём наблюдения и измерения их длительности.

Например, ранее широко использовали "Межотраслевые укрупненные нормативы времени на разработку конструкторской документации", утвержденные Постановлением Минтруда СССР от 14.11.1991 № 69, а также "Типовые нормативы времени на разработку конструкторской документации. ШИФР 13.01.01" (утверждены ФГБУ "НИИ ТСС" Минтруда России 07.03.2014 № 003) [6]. Указанные документы содержат нормативы времени на разработку конструкторской документации по видам и по стадиям работ.

### **Проблемные вопросы, возникающие при оценке трудоёмкости проектирования аппаратуры ВВСТ с использованием методов, основанных на хронометраже. "Парадокс плохого программиста"**

При определении трудозатрат проектирования аппаратуры ВВСТ с применением нормативов времени на разработку конструкторской документации, полученных с использованием хронометража, возникает проблема объективной оценки сопутствующих проектированию работ, сложное поддающихся нормированию (например, проведение патентного поиска и патентных исследований, формирование требований к приборному и модульному составу, разработка математической модели объекта управления, разработка программно-математического обеспечения изделия). Выполнение указанных видов работ сопряжено с высоким уровнем неопределённости в отношении объёма времени, требуемого для достижения результата.

Современные образцы вооружения, военной и специальной техники представляют собой сложные аппаратно-программные комплексы.

В ходе выполнения НИОКР по их созданию, кроме рабочей конструкторской документации, необходимой для изготовления аппаратуры, разрабатывается математическое и программное обеспечение изделия (МПО). Объективная оценка трудозатрат разработки математического и программного обеспечения представляет серьезную проблему. Достаточно часто при оценке трудозатрат разработки МПО используется подход к определению трудоемкости, в основе которого лежат средняя работоспособность программиста, выраженная в количестве символов исходного кода в час, и объем МПО, выраженный в количестве символов исходного кода.

Подобный подход не может считаться объективным. Программирование как вид профессиональной деятельности включает значительную творческую составляющую. Одну и ту же программу можно написать различными способами. В качестве примера рассмотрим программу для вычисления  $10!$  ( $N$ -факториала для значения  $N = 10$ ).

Вариант 1:

```
if(N < 0) // если пользователь ввел отрицательное число,
    return 0; // возвращаем ноль
if (N == 0) // если пользователь ввел ноль,
    return 1; // возвращаем факториал от нуля
else
    return N * fact(N - 1);
```

В данном случае пользователю достаточно присвоить  $N$  значение, равное 10, и программа произведет все необходимые вычисления. Программа является универсальной и может вычислить факториал для любого значения  $N$ .

Вариант 2:

```
if(N < 0) // если пользователь ввел отрицательное число,
    return 0; // возвращаем ноль
if (N == 0) // если пользователь ввел ноль,
    return 1; // возвращаем факториал от нуля
(это 1 =)
else // во всех остальных случаях
    return 1*2*3*4*5*6*7*8*9*10;
```

Во втором случае программа имеет больший объем (в символах исходного кода), однако обладает меньшим функционалом: способна решать только задачу определения  $10!$ . В общем случае, чем меньше объем программного кода, тем быстрее и стабильнее работает МПО.

Опытный программист способен написать подобную программу за 5 мин, используя минимальное количество символов исходного кода,

тогда как неопытному на решение данной задачи может потребоваться несколько часов при значительно большем объеме кода.

Таким образом, при оценке фактических затрат по разработке МПО мы сталкиваемся с "парадоксом плохого программиста": чем хуже и медленнее работает программист, тем выше трудоемкость разработки МПО и стоимость изделия военной техники.

#### **Актуальность вопроса методического обеспечения деятельности предприятия приборостроительной отрасли в части определения плановых и фактических трудозатрат проектирования аппаратуры ВВСТ**

В образцах ВВСТ широко используется продукция приборостроительной отрасли, такая, как измерительные устройства, автоматизированные системы управления, программно-аппаратные комплексы. Для обеспечения выполнения заданных в техническом задании на создание образца ВВСТ функций разрабатываются приборы, блоки, модули, выполняющие отдельные функциональные операции и интегрированные в системы и комплексы аппарата. Широкая номенклатура разрабатываемых приборов, особенности проектирования, учитывающие условия эксплуатации и функциональное назначение, являются факторами, значительно усложняющими процесс проектирования и, как следствие, определения плановых трудозатрат работников, непосредственно участвующих в процессе разработки и производства продукции. В таких сложных технических объектах, как боевые корабли, номенклатура изделий приборостроительной отрасли может составлять до 70 % от стоимости объекта. Наиболее дорогостоящими и наукоемкими изделиями при этом являются комплексы связи и системы управления бортовыми техническими средствами.

Не менее актуальным является вопрос оценки фактических трудозатрат разработчика и изготовителя ВВСТ специалистами военных представительств МО РФ. Постановлением Правительства РФ от 11.08.1995 № 804 "О военных представительствах Министерства обороны Российской Федерации" утверждено "Положение о военных представительствах Министерства обороны Российской Федерации". Данным Положением на военные представительства Министерства обороны Российской Федерации возложена функция выдачи заключений о цене военной продукции, а на руководителей организаций промышленности — обоснование цен на военную продукцию, согласование их с военными представительствами [7].

При определении технологической трудоемкости изготовления ВВСТ, а также при оценке трудозатрат разработки конструкторской и программной документации между исполнителем работы и военным представительством зачастую возникают разногласия из-за различного подхода к оценке трудоёмкости выполненных работ, связанные с отсутствием единых отраслевых нормативно-методических документов для определения трудозатрат на проектирование изделий ВВСТ.

Нередко численное значение того или иного норматива трудоёмкости ставится под сомнение в ходе проверок расчётно-калькуляционных материалов исполнителя головным исполнителем ГОЗ или надзорными органами в связи с различным подходом к оценке трудоёмкости выполненных работ. В качестве примера в таблице представлены приведенные к формату А4 нормы времени на разработку однотипных конструкторских документов, разрабатываемых на этапе технического проекта в соответствии с методиками по определению трудоёмкости опытно-конструкторских работ, применяемыми в трех организациях оборонно-промышленного комплекса (ОПК).

Рассматривая данный вопрос, следует отметить, что с точки зрения хозяйствующего субъекта, выполняющего функцию разработчика военной техники, наличие единых отраслевых нормативов и методики определения плановой трудоёмкости работ по созданию аппаратуры ВВСТ и оценки фактических трудозатрат, учитывающих особенности отрасли, позволило бы с большей точностью планировать загрузку организации, формировать коммерческие предложения для участия в конкурентных процедурах,

проводимых Государственным заказчиком, выполнять обоснование цен на военную продукцию, согласование их с военными представительствами МО РФ.

### Концепция проведения оценки трудоёмкости проектирования аппаратуры ВВСТ

В рамках данной концепции предлагается воспользоваться методом факторного анализа, базирующимся на использовании известного значения трудоемкости работ по созданию изделия-аналога. При отсутствии полного функционального аналога разрабатываемой аппаратуры целесообразно произвести декомпозицию изделия до уровня составных частей, имеющих полные функциональные аналоги.

Трудоёмкость проектирования аппаратуры следует определять для этапа технического проектирования (ТП) в связи с выявлением на данном этапе окончательных технических и принципиальных технологических решений по проектируемому изделию.

Трудоёмкость остальных этапов ОКР следует определять с использованием коэффициентов, учитывающих изменение объёма выполняемых работ на соответствующих этапах ОКР относительно этапа технического проектирования, определенных с использованием статистических методов.

Для выполнения расчета трудоемкости проектирования аппаратуры выбирают аналог из числа разработанных изделий, по которым известны трудоемкости разработки технического проекта и которые по выполняемым функциям и своим характеристикам наиболее близки к разрабатываемому изделию.

**Нормы времени на разработку однотипных конструкторских документов в трех организациях ОПК**

Наименование документа	Трудоёмкость 1 листа формата А4, человеко-час		
	Организация А	Организация В	Организация С
Схема структурная, соединений, подключений	24 (до 10 элементов схемы)	10 (количество элементов схемы не нормируется)	3,3 (от 9 до 32 элементов схемы)
Схемы электрические структурные (общие)	13 (до 15 элементов схемы)	11,9 (количество элементов схемы не нормируется)	3,3 (от 9 до 32 элементов схемы)
Демонстрационные чертежи	6 (до 15 элементов схемы)	15 (количество размеров чертежа не нормируется)	5,2 (от 9 до 32 элементов схемы)
Габаритные чертежи	5 (до 30 размеров в чертеже)	8 (количество размеров чертежа не нормируется)	4,9 (от 18 до 32 размеров чертежа)
Пояснительная записка	21	8	3,15
Технические условия	40	8	2,79
Программа и методика испытаний	26	7,2	3,24
Техническое задание	26	8	3,0
Извещение об изменении	6,5	4	3,0

Трудоемкость разработки нового изделия на этапе технического проекта определяется соотношением

$$T_{\text{ТП}_{\text{раз}}} = T_{\text{ТП}_{\text{ан}}} k_3 M \gamma \delta,$$

- где  $T_{\text{ТП}_{\text{раз}}}$  — трудоемкость разработки ТП нового изделия;  
 $T_{\text{ТП}_{\text{ан}}}$  — трудоемкость разработки ТП изделия-аналога;  
 $k_3$  — коэффициент заимствования (относительная величина, определяемая разницей между 1 и отношением процента заимствования в новой разработке КД и (ПО)ПД аналога к 100 %);  
 $\gamma$  — коэффициент учета использования прогрессивных методов проектирования;  
 $\delta$  — коэффициент учета сохранения объема и номенклатуры выпускаемой документации (определяется как отношение объема и номенклатуры выпускаемой документации для нового изделия к объёму и номенклатуре документации аналога);  
 $M$  — коэффициент масштабирования, который определяется по формуле

$$M = \frac{m_{\text{раз}} + n_{\text{раз}}}{m_{\text{ан}} + n_{\text{ан}}}$$

$m_{\text{раз}}, m_{\text{ан}}$  — число точек контроля разрабатываемого изделия и аналога. Под числом точек контроля понимаются количество параметров, контролируемых аппаратурой на объектах управления, и/или входные сигналы от смежной аппаратуры (исключая сигналы самодиагностики). Для аппаратуры электропитания или аппаратуры централизованного питания — это число фидеров сигнализации;

$n_{\text{раз}}, n_{\text{ан}}$  — число точек управления разрабатываемого изделия и аналога. Под числом точек управления следует понимать количество управляемых аппаратурой приборов, устройств или количество управляющих сигналов. Для аппаратуры электропитания или систем централизованного питания — это число силовых фидеров.

Представленный подход допустимо применять для экспресс-оценки трудоемкости работ по созданию аппаратуры ВВСТ. Достоинством концепции являются небольшие временные затраты на проведение расчетных работ и широкое использование коэффициентов, позволяющих учесть отличия создаваемого изделия от функционального аналога. Недостатком концепции является высокая зависимость от достоверности исходных данных, используемых при расчёте (значения трудоёмкости работ по созданию изделия-аналога).

Для повышения точности проведения оценки трудоёмкости проектирования при использовании данного подхода представляется целесообразным применить механизм проверки корректности расчетов трудоемкости на соответствие фонду рабочего времени подразделения, задействованного в выполнении работы, исходя из сроков выполнения контракта и численности сотрудников подразделения.

### Заключение

В приборостроительной отрасли отсутствуют единые нормативные документы, регламентирующие порядок проведения анализа трудозатрат при планировании и выполнении НИОКР по созданию аппаратуры ВВСТ. Необходимость разработки отраслевой методики определения трудоёмкости работ по созданию аппаратуры ВВСТ в приборостроительной отрасли обусловлена возможным положительным эффектом от повышения точности определения стоимостных характеристик вооружения, военной и специальной техники, определяемых в целях формирования ГПВ, ГОЗ и заключения контрактов на поставку продукции военного назначения, а также снижением количества разногласий, возникающих между предприятиями промышленности и военными представительствами МО РФ, выполняющими функцию выдачи заключений о цене военной продукции, в том числе прогнозной. Автором предложен концептуальный подход к оценке трудоемкости проектирования, на основе которого целесообразно разработать отраслевую методику экспресс-оценки трудоёмкости работ по созданию аппаратуры вооружения, военной и специальной техники.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон "О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд" от 05.04.2013 № 44-ФЗ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.consultant.ru>
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 2.12.2017 № 1465 "О государственном регулировании цен на продукцию, поставляемую по государственному оборонному заказу" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.consultant.ru>
3. Приказ Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 8.02.2019 № 334 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.consultant.ru>
4. Основные показатели деятельности организаций, выполняющих научные исследования и разработки [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru>
5. Методические указания к выполнению расчетного задания "Экономические показатели технологичности конструкции изделия". — Харьков: Харьковский политехнический институт, 2013.
6. "Типовые нормативы времени на разработку конструкторской документации. ШИФР 13.01.01" (утверждены ФГБУ "НИИ ТСС" Минтруда России 07.03.2014 № 003) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.consultant.ru>
7. Постановление Правительства Российской Федерации от 11.08.1995 № 804 "О военных представительствах Министерства обороны Российской Федерации" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.consultant.ru>

## **PROBLEMATIC ISSUES OF LABOR COST ESTIMATION IN THE DESIGN OF ARMAMENT EQUIPMENT, MILITARY AND SPECIAL EQUIPMENT**

*D. V. Ulanov*

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*This article discusses problems arising when determining the cost of for armament equipment, military and special equipment and conceptual approach to estimating the labor costs of the design of armament equipment, military and special equipment.*

*Keywords:* estimation, rationing, military equipment, standards, labor intensity, equipment, state defense order, military representations offices, national security and defense capability.

Bibliography — 7 references.

*Received May 27, 2021*

УДК 658.512.22+004.057.6

DOI: 10.52190/1729-6552\_2021\_3\_34

## ТЕХНОЛОГИЯ АУТЕНТИЧНОЙ КОНВЕРТАЦИИ ПРОЕКТНЫХ ДАННЫХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ CAD-СИСТЕМ

Н. А. Пиликов

ООО «Глосис-Сервис», Санкт-Петербург, Россия

Д. К. Щеглов, канд. техн. наук

АО «Конструкторское бюро специального машиностроения»,

ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д. Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Россия

*Предлагается технология аутентичной конвертации проектных данных, позволяющая корректно перенести конструкторские разработки из одной системы автоматизированного проектирования в другую с сохранением ассоциативных связей между 3D-моделью изделия и чертежами.*

*Ключевые слова:* проектные данные, система автоматизированного проектирования, импортозамещение, конвертация данных, аутентичность данных, технология.

Обеспечение импортозамещения, технологической безопасности и независимости в сфере разработки и производства сложной наукоемкой продукции является одной из наиболее приоритетных задач по защите национальных интересов Российской Федерации [1, 2]. В частности, в условиях введенных ограничений на поставку и техническую поддержку ряда зарубежных инженерных программных средств высокотехнологичные предприятия, прежде всего оборонно-промышленного комплекса [3], должны иметь возможность оперативного перехода от использования одной системы автоматизированного проектирования (CAD-системы) к другой. Такой переход всегда связан с переносом текущих конструкторских проектов (проектных данных) в новую CAD-систему.

Конструкторский проект, выполняемый в современной параметрической CAD-системе, как правило, состоит из 3D-модели изделия с ассоциативно связанным с ней комплектом чертежей [4]. При этом в теории автоматизированного проектирования ассоциативная связь — это специализированный термин, означающий, что

элементы электронной модели изделия связаны таким образом, что можно "перемещаться" от одного элемента к другому.

Представленные на чертежах геометрические элементы являются точными проекциями 3D-моделей деталей или сборочных единиц по плоскостям разных видов. Иными словами, чертежи в параметрической CAD-системе формируются как объекты, полностью зависящие от геометрии 3D-моделей. В случаях, если проектной группе необходимо перейти от использования одной CAD-системы к другой и продолжать процесс проектирования, необходимо конвертировать не только 3D-модель изделия, но и все связанные с ней чертежи.

На рынке CAD-систем отсутствуют какие-либо программные средства, обеспечивающие полностью автоматизированное преобразование проектных данных из одной CAD-системы в другую с сохранением ассоциативных параметрических связей 3D-модели изделия с комплектом чертежей. Однако задача переноса непосредственно самой 3D-модели из CAD-системы-1 в CAD-систему-2 (например, из SolidWorks (SW) в SolidEdge (SE)) успешно решается за счет применения прямых конверторов или нейтральных форматов [5]. При этом новая 3D-модель, преобразованная в формат CAD-системы-2, наследует все параметрические элементы исходной 3D-модели и может далее легко редактироваться. Перевод же чертежей, разработанных на основе проекций исходной 3D-модели, из CAD-системы-1 в CAD-систему-2 традиционно осуществляется через формат DXF (*Drawing*

---

**Пиликов Николай Анатольевич**, генеральный директор.

E-mail: npilikov49@gmail.com; soft@glosys.ru

**Щеглов Дмитрий Константинович**, доцент, начальник расчетно-исследовательского отделения, заведующий базовой кафедрой "Средства ВКО и ПВО".

E-mail: \_dk@bk.ru; d.shcheglv@kbsm.su

*Статья поступила в редакцию 18 мая 2021 г.*

© Пиликов Н. А., Щеглов Д. К., 2021

eXchange Format), что приводит к потере ассоциативных параметрических связей комплекта чертежей с 3D-моделью изделия (рис. 1).

В представленной на рис. 1 ситуации разрыв ассоциативных связей между 3D-моделью изделия и комплектом чертежей нарушает целостность проектных данных, что не позволяет при изменении 3D-модели в автоматическом режиме обновлять графические виды на чертежах. Для восстановления целостности проектных данных после конвертации 3D-модели изделия из одной CAD-системы в другую конструкторской группе приходится тратить значительное время на "перевыпуск" чертежей. Таким образом, для многих конструкторских групп, имеющих значительные наработки в какой-либо параметрической CAD-системе, наличие технологии полностью автоматизированной аутентичной конвертации проектных данных из CAD-системы-1 в CAD-систему-2 является весьма актуальным.

В общем виде задача обеспечения аутентичности сконвертированных данных формулируется следующим образом. Пусть  $A$  — операция конвертации проектных данных. Тогда корректность процесса конвертации в общем виде можно описать тройкой Хоара:  $\{P\} A \{Q\}$ . Смысл этого выражения заключается в следующем: любое выполнение  $A$ , начинающееся в состоянии,

где утверждение  $P$  истинно, завершится и в заключительном состоянии будет истинно утверждение  $Q$ . При этом  $P$  является предусловием, а  $Q$  — постусловием [6]. Формула определяет полную корректность, которая гарантирует завершаемость (конечность) операции  $A$ . Помимо этого существует понятие частичной корректности, которое гарантирует выполнение постусловия  $Q$  только при завершении выполнения операции  $A$ .

Рассмотрим конструкторский проект  $\Omega^{(w)} = (M^{(w)}, D^{(w)}, S^{(w)})$ , где  $w$  — индекс проекта;  $M^{(w)} = \{m_i^{(w)}\}_{i=1}^n$  — множество 3D-моделей  $m_i^{(w)}$ ;  $D^{(w)} = \{d_j^{(w)}\}_{j=1}^g$  — множество чертежей  $d_j^{(w)}$ ;  $S^{(w)} = \{s_k^{(w)}\}_{k=1}^e$  — множество ассоциативных связей между  $M^{(w)}$  и  $D^{(w)}$ ;  $n, g, e$  — количество элементов множеств  $M^{(w)}$ ,  $D^{(w)}$  и  $S^{(w)}$  соответственно. С учетом введенных обозначений необходимое условие корректности процесса конвертации проектных данных будет иметь следующий вид:

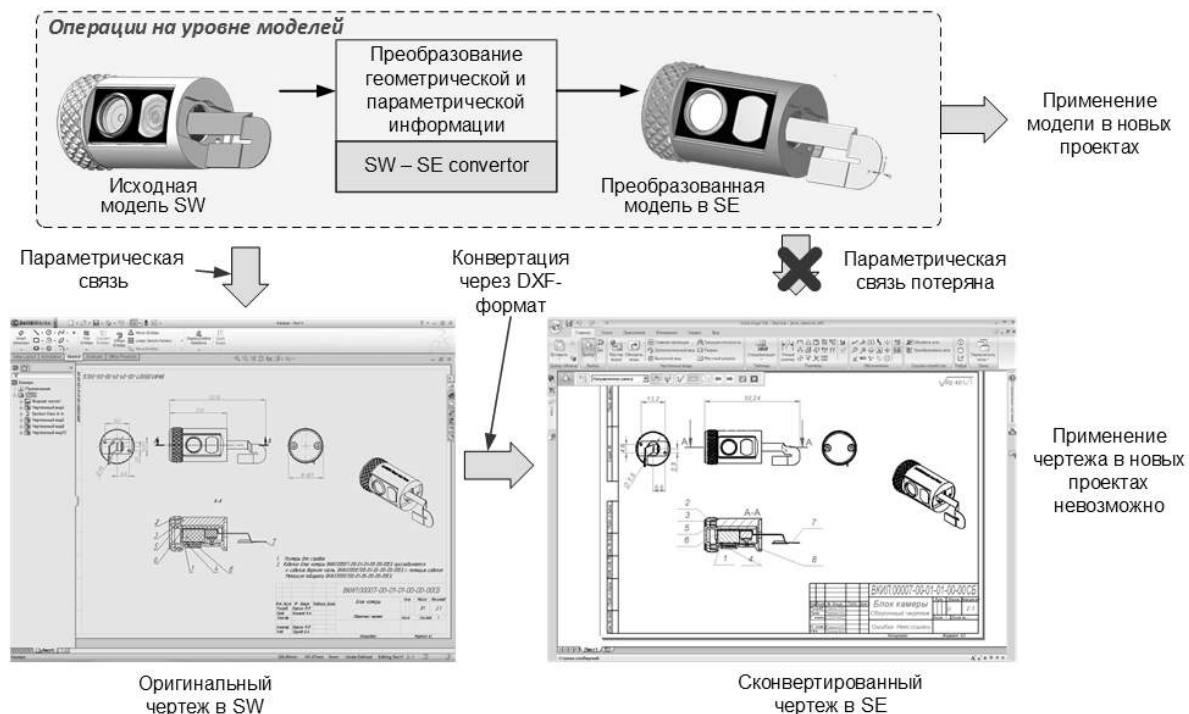


Рис. 1. Возникновение потери параметрической связи "модель—чертеж" при конвертации проектных данных из CAD-системы-1 в CAD-систему-2

$$\left\{ U^{(1)} : \Leftrightarrow true \right\} A \left\{ U^{(1)} = U^{(2)} : \Leftrightarrow true \right\},$$

где  $U^{(1)}$  и  $U^{(2)}$  — суммы  $U^{(w)} = \sum_{i=1}^n m_i^{(w)} + \sum_{j=1}^g d_j^{(w)} + \sum_{k=1}^e s_k^{(w)}$ , соответствующие проектам в CAD-системах 1 и 2.

Рассмотрим возможное решение поставленной задачи. В основе предлагаемой технологии конвертации проектных данных из одной параметрической CAD-системы в другую лежит автоматическая выгрузка всех элементов оригинального чертежа в специальный нейтральный формат файла, содержащий логическую структуру частей чертежа и его элементов, между которыми учитываются все зависимости (см. рис. 2).

В нейтральном формате файла каждый вид и каждый элемент, входящий в вид, не зависят от оригинального формата исходной CAD-системы, а все геометрические элементы, их свойства и привязанные к ним аннотации, тексты и значки переносятся в специальную древовидную структуру. В этой структуре присутствуют все зависимости между частями и элементами чертежа, которые необходимо учесть при последующем его восстановлении (регенерации) в CAD-системе-2. К таким элементам относятся как видимые на чертеже, так и невидимые объекты, например плоскости, системы координат, цифровые и текстовые свойства (рис. 3).

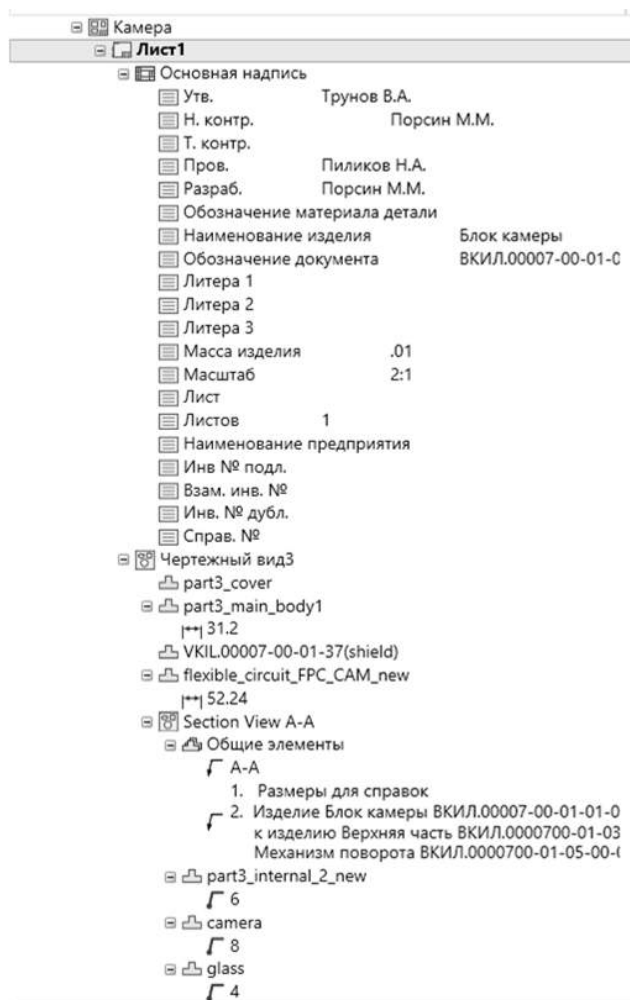


Рис. 2. Пример структуры сборочного чертежа изделия

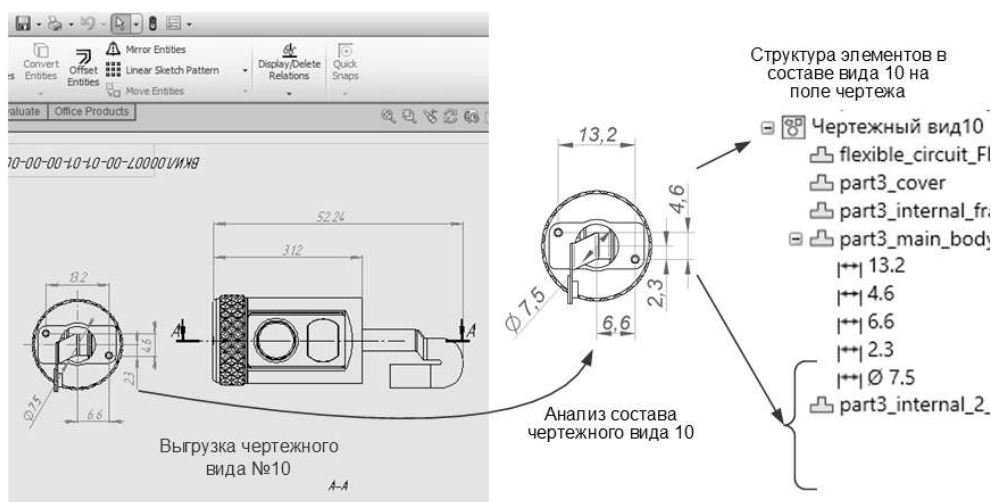


Рис. 3. Пример детальной выгрузки всех элементов чертежного вида

Наличие файла нейтрального формата позволяет полностью автоматизировать процесс переноса проектных данных из CAD-системы-1 в CAD-систему-2. При этом процесс геометрического преобразования 3D-модели изделия (сборки) и моделей входящих в сборку деталей остается прежним, а на уровне чертежей все происходит совсем по-другому. Чертеж из CAD-системы-1 не конвертируется в CAD-систему-2, а автоматически создается заново с пустой форматки в CAD-системе-2 на основе выгруженной нейтральной структуры чертежа и конвертированной 3D-модели (рис. 4).

Как видно из рис. 4, предлагаемая технология переноса проектных данных из одной CAD-системы в другую обеспечивает сохранение ассоциативных параметрических связей 3D-модели изделия с комплектом чертежей.

Рассмотренная технология не требует вмешательства пользователя в процесс конвертации проектных данных и может быть использована для быстрого массового перехода высокотехнологического предприятия на новую CAD-систему. Процесс конвертации может быть настроен практически на любые пары параметрических CAD-систем (Компас-3D, CREO, Inventor, CATIA и другие).

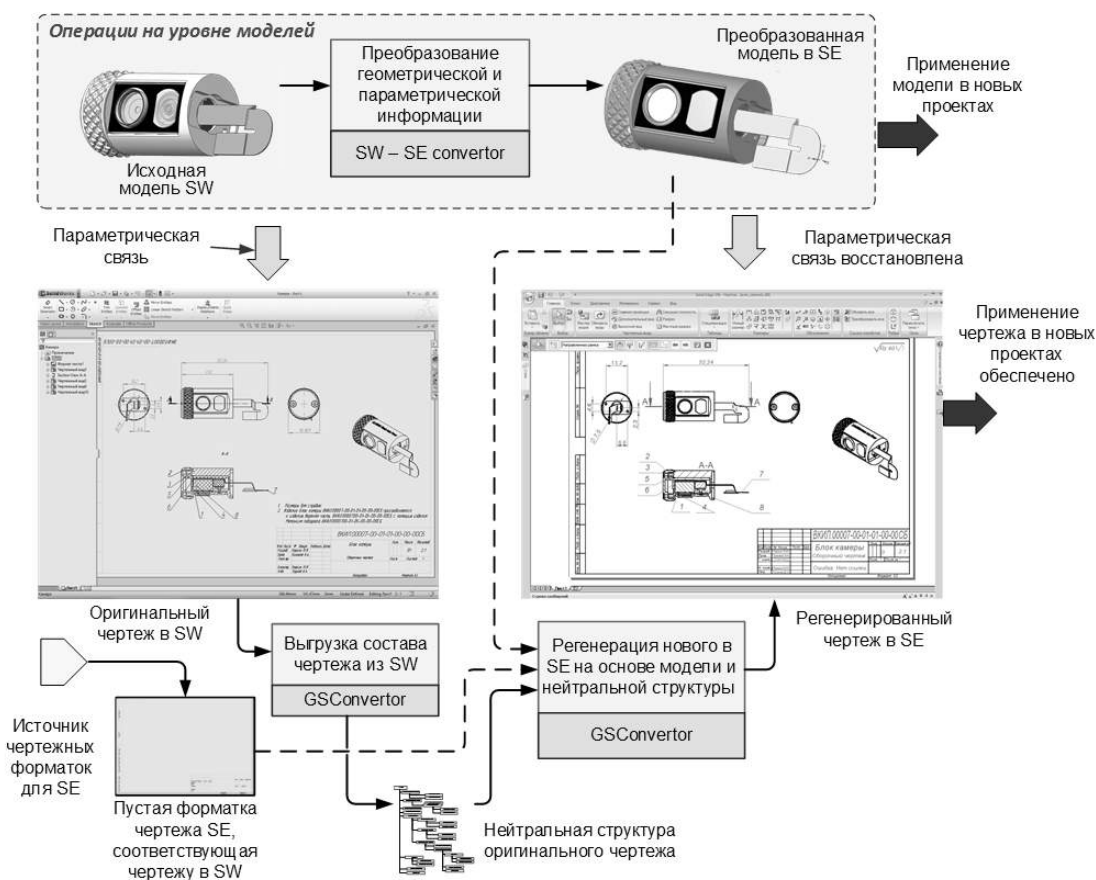


Рис. 4. Схема процесса аутентичной конвертации проектных данных в параметрических CAD-системах

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации. Утв. Указом Президента Российской Федерации от 31 декабря 2015 г. № 683 [Электронный ресурс]. Режим доступа: Система КонсультантПлюс.
2. Стратегия экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года. Утв. Указом Президента Российской Федерации от 13 мая 2017 г. № 208 [Электронный ресурс]. Официальный сайт Президента России. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/41921>

3. Щеглов Д. К., Пиликов Н. А., Тимофеев В. И. Концептуальные основы цифровой трансформации организаций оборонно-промышленного комплекса // Автоматизация в промышленности. 2021. № 2. С. 13—23.
4. Алексеева В. Ю., Пиликов Н. А., Щеглов Д. К. Некоторые перспективные направления развития информационного обеспечения жизненного цикла сложных технических систем // Инновации. 2015. № 2(196). С. 116—120.
5. Пиликов Н.А. Объемное проектирование изделий машиностроения с применением стандартов трехмерного документирования. Конструкторские задачи // Металлообработка. 2010. № 5(59). С. 49—53.
6. Bertrand Meyer Object-Oriented Software Construction. Second edition. — Santa Barbara (California): Interactive Software Engineering Inc. (ISE), 2005. — 1255 p.

## **TECHNOLOGY OF AUTHENTIC PROJECT DATA CONVERSION PARAMETRIC CAD SYSTEMS**

*N. A. Pilikov*

Ltd "Glosys-Service", St. Petersburg, Russia

*D. K. Shcheglov*

JSC "Design Bureau of Special Mechanical Engineering",  
FSBEI of HE "Baltic State Technical University "VOENMECH" D. F. Ustinova",  
St. Petersburg, Russia

*The technology of authentic conversion of design data is proposed, which allows to correctly transfer design developments from one computer-aided design system to another while preserving associative links between the 3D product model and drawings.*

*Keywords:* design data, computer-aided design system, import substitution, data conversion, data authenticity, technology.

Bibliography — 6 references.

*Received May 18, 2021*



УДК 004:007:355:51-7:519.6:519.2:62  
DOI: 10.52190/1729-6552\_2021\_3\_39

## КЛАССИФИКАЦИЯ БИОНИЧЕСКОЙ РОБОТОТЕХНИКИ И ОБЗОР НЕКОТОРЫХ ЕЕ ЗАРУБЕЖНЫХ ОБРАЗЦОВ

К. В. Пителинский, канд. техн. наук; Н. В. Федоров, канд. техн. наук;

С. О. Маковей; М. П. Сигида

ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Россия

*Рассмотрены роботизированные системы, основанные на бионических принципах работы. Приведены возможные способы их классификации. На основе проведенного анализа сделан вывод о перспективности широкого применения подобных систем в современных реалиях для различных практических приложений.*

*Ключевые слова:* робототехника, бионические принципы движения, животноподобные роботы, кибернетика, циклическое управление, цикл НОРД, имитационное моделирование.

Ранее авторами были рассмотрены некоторые принципы организации успешного управления ведением боевых действий с помощью циклической методологии Дж. Бойда НОРД, реализованной на платформе интеграции робототехники и интеллектуальной системы принятия решений (на примере зарубежных систем, например подобных американской системе ТИТАН). Далее будет дана классификация зарубежных бионических роботов на основе предложенной авторской классификации и имеющейся у них в распоряжении информации о робототехнике рассматриваемого типа.

Неотъемлемой частью процесса эксплуатации как роботов, так и других автоматизированных систем остается триада безопасности конфиденциальность—целостность—доступность (модель CIA, основа обеспечения защищенности объектов информатизации, содержащая три базовые группы нарушений: конфиденциальности, целостности и доступности информации). Использо-

зование роботизированных систем на поле боя своей главной задачей предполагает защиту от перехвата управления, вывода робота из строя и т. п., поскольку от работоспособности и от уровня защищенности беспилотных систем зависят жизни людей и исход сражения.

Современные тенденции таковы, что человек внедряет роботизированные аппараты во все сферы деятельности. Главным образом это относится к боевым действиям, мониторингу территорий (земных, водных или космических), различным исследованиям, спасательным операциям и т. д.. Все перечисленные области не могут обойтись без обеспечения должной безопасности технических и технологических систем. Одним из способов их маскировки послужило создание аппаратов на основе бионических (животноподобных) принципов.

Природа разработала множество оригинальных проектных решений, за миллионы лет прошедших обкатку в экстремальных условиях. Биосфера Земли полна организмами обладающими уникальными свойствами, что дает человеку широкий спектр возможностей творческого прототипирования на их основе технических систем различного назначения и уровня сложности [1]. Из-за этого во многих промышленно развитых странах ведется активная работа в области создания бионических роботов. Не всегда эти исследования и разработки ведут к созданию военных аппаратов, но на основе подобных разработок появляется очень много гражданской техники, постепенно получающей массовое распространение.

Несмотря на инновационность и бурный рост числа разработок в данной области, пока еще не был приведен подробный обзор бионических роботизированных аппаратов и не была приве-

**Пителинский Кирилл Владимирович**, доцент, 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

**Маковей Сергей Олегович**, студент кафедры "Информационная безопасность".

E-mail: sergej.magistr98@mail.ru

**Сигида Максим Павлович**, студент кафедры "Информационная безопасность".

E-mail: maxsigi@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 8 апреля 2021 г.

© Пителинский К. В., Федоров Н. В., Маковей С. О., Сигида М. П., 2021

дена классификация, которая охватывала бы все разработки роботизированных систем, использующие бионические принципы движения.

### Способы классификации

Можно выделить множество способов кластеризовать подобные аппараты в связи с большим их разнообразием. Для точной и корректной их кластеризации надо выделить признак или группу признаков бионических роботов, по которым и будет производиться сравнение (как общеприменимые к любым роботизированным аппаратам, так и применимые только к узкоспециализированной технике).

*Время работы без подзарядки* — простая характеристика, легко определяемая для любого робота. Она очень важна и может существенно повлиять на выбор для использования конкретного робота ввиду своей общей применимости к любому беспроводному электронному устройству, но не несет должной смысловой нагрузки, позволяющей использовать ее для кластеризации объектов изучаемого вида робототехники.

*Интегральная метрика скрытности* определяет уровень заметности роботизированного аппарата для противника. Она хорошо подойдет для аппаратов и бионических роботов, осуществляющих функции разведки, или для скрытно перемещающихся устройств. Однако многие роботизированные аппараты подразумевают открытое использование, и данная метрика к ним неприменима.

Следовательно, кластеризовать технику, работающую по бионическим принципам, нужно по группе признаков и характеристик, применимых ко всем роботам своего вида и максимально подчеркивающих их особенности и отличия не только друг от друга, но и от других роботов (которых в общем случае нельзя отнести к бионическим).

Для максимизации данных требований можно использовать машинное обучение. Выделим задачи, часто встречающиеся при машинном обучении, которые эффективно решаются:

- классификации — определение отношения объекта к некоторому заранее известному классу (например, по фотографии танка определить его тип и модель);
- регрессии — предсказание количественного или порядкового показателя (например, по данным разведки определить количество вражеской военной техники);
- кластеризации — разделение множества объектов на неизвестные классы (именно к за-

даче кластеризации относится проблема выделения различных классов внутри множества роботизированных аппаратов).

Почти все алгоритмы кластеризации основаны на пространственной плотности объектов (все объекты располагаются в одном проектном гиперпространстве, где каждая ось базиса есть некоторый признак, присутствующий у всего множества объектов). Если определить признаки для всех аппаратов и передать их любой модели машинного обучения, разделяющей объекты в гиперпространстве, получим выделенные кластеры. Можно использовать модели, обученные разными алгоритмами кластеризации (начиная от *k*-means и заканчивая более сложными, типа *k*-medoids, DBSCAN и т. д.). Однако неизвестно точное число классов, которые оптимально разделяют объекты на классы с тем, чтобы число классов было гиперпараметром (признаком, задаваемым при обучении модели). Получим несколько кластеров, объекты в которых максимально отдалены от объектов в других кластерах в гиперпространстве, что позволит выделить группы максимально схожих между собой аппаратов (но максимально отличных от остальных).

Остается серьезная проблема, связанная с тем, по каким именно признакам будут строиться модели машинного обучения и, как следствие, выделяться кластеры. Для возможности построения проектного гиперпространства необходимы признаки (некоторые присущие всем объектам свойства, например масса). Признаки должны быть максимально полезны для модели, но определить, какой именно вклад вносит отдельный признак в итоговый результат моделирования, можно, лишь только обучив модель. Перечислим способы выделения признаков объектов для моделей машинного обучения.

*Ручное выделение признаков и их группировка в таблицу.* Недостаток метода — сложность выделения широкого списка признаков, присущих всем объектам, и отсутствие гарантии того, что не появятся новые аппараты с отличными от нынешних признаками (все обученные модели и собранные данные могут не работать в новых условиях).

*Выделение признаков на основе фотографий роботизированных аппаратов.* Данный метод лишен недостатков табличного метода. Его недостаток — малая интерпретируемость разделения на кластеры (в одном кластере могут оказаться абсолютно разные, по мнению человека, аппараты, например роботизированные акула и аист). Если пары роботов рассматривать отдельно, то сразу видны их различия. Однако при рассмотрении множества роботов помимо них в гиперпро-

странстве между такими двумя аппаратами может оказаться очень много общих черт относительно множества прочих аппаратов.

При классификации новой разработки или робота, который изначально не был отнесен к какому-либо кластеру, системный аналитик не сможет сделать это без модели (нужно как минимум знать границы кластеров в гиперпространстве и занести в гиперпространство новый объект, задающий подлежащий классификации аппарат), что сильно затрудняет массовую и самостоятельную классификацию.

По мере использования и классификации все большего количества бионических роботов возникает проблема использования избранного способа классификации. Высока вероятность того, что первая построенная модель не дообучилась на данных, которые с ее помощью начинают классифицировать (при обучении было слишком мало примеров по сравнению с нынешним временем или произошли изменения в технологиях и теперь роботы сильно отличаются от тех, по которым была построена модель). Возникает необходимость в новой модели, что ведет к изменению границ или к выделению новых кластеров. Частоту и необходимость обучения новой модели нужно оценивать по уровню необходимости и оправданности (корректная модель при обучении на большем объеме данных может переучиться и будет хуже классифицировать, чем ранее).

Возможно и ручное выделение некоторого абстрактного признака, присущего всем бионическим роботам, имеющего настолько большую корреляцию со всеми остальными признаками, что классифицируя только по нему, можно добиться максимального и корректного разделения всего множества роботов сразу по множеству признаков (без необходимости выделять и оценивать их все сразу).

Для примера рассмотрим классификацию войск (т. к. большинство бионических роботов разрабатывалось для военных целей или создавалось на основе таких роботов).

Государства, имеющие выход к морю, обычно делят свои вооруженные силы на:

- военно-воздушные силы, предназначенные для выполнения боевых задач в воздухе и осуществления атаки с воздуха;
- военно-морской флот — силы, осуществляющие боевые задачи в пределах водной среды, в морях и океанах;
- сухопутные войска, зоной непосредственного действия которых является суша.

У некоторых стран есть и космические войска для выполнения боевых задач в космическом пространстве и из него.

Аналогично такой классификации можно разделить роботов, предназначенных и способных действовать в определенном месте пространства, на *воздушные, наземные, водные, космические и подземные*.

Массовое и повсеместное использование робототехники (особенно бионической, опирающейся на проверенные за миллионы лет эволюции природные морфологические принципы) позволит ЛПР не только сократить время принятия управленческих решений, но и повысить их качество (при общем снижении расхода ресурсов, требуемых для их реализации). Авторам видится, что предложенная классификация наглядна и позволяет без дополнительных усилий и технических средств классифицировать любой новый бионический аппарат. Аппараты одного класса имеют много близких по значениям признаков и специфических свойств (воздушные бионические роботы будут иметь близкие задачи, работы, способы использования, а их движители будут максимально похожи, поскольку они основаны на принципах схожих между собой реальных птиц).

### Использование имитационного моделирования

По данным Global Conflict Tracker [2], на начало 2021 г. в мире происходит около 25 глобальных конфликтов. Девять из них носят легкую фазу: несмотря на напряжение между сторонами конфликта боевые действия отсутствуют (это свойственно африканским странам, например Мали, Центральной Африканской Республике и Демократической Республике Конго, где после обострения локальных конфликтов присутствует миссия ООН, что минимизирует любые военные действия, но не ликвидирует сам конфликт и напряжение). Другие конфликты, например споры КНР в Южно-Китайском море, не переходят в какие-либо столкновения и акты агрессии, а носят характер подготовки к будущему военному обострению в регионе.

Однако сохраняются конфликты, при которых с разной периодичностью происходят боевые действия. Обычно это небольшие локальные столкновения, не приносящие больших потерь какой-либо из сторон. К таким конфликтам можно отнести борьбу с наркокартелями в Мексике, конфликт в Украине, войну в Афганистане, в Секторе газа или недавний Нагорно-Карабахский конфликт. Видно, что разработка военных технологий актуальна: из-за масштабной и успешной цифровизации общества, охватившей все его сферы, военная робототехника — хороший пример развития инноваций армии.

Пока технологии бионических военных роботов находятся на стадии активного развития, а их применение в реальных боевых условиях редко (они используются локально для узкоспециализированных задач, например для разведки с воздуха). Проверка их функционала в настоящем бою с возможностью передачи им более сложных и опасных задач осложнена малым количеством военных конфликтов, невозможностью по политическим причинам прямо участвовать в конфликте, большим риском захвата робота противником с дальнейшей утечкой технологии, большими рисками для жизни операторов и технического персонала. Ввиду этих ограничений появляется необходимость в имитационной модели, способной описать максимально схожие с боевыми условия и задачи. По такой модели можно проводить исследования и доработки конструкции техники без опасения потерь персонала, оборудования или попадания технологий к противнику.

Процесс моделирования начинают с цели разработки модели, по которой далее выстраивают границы системы и задают уровень детализации моделируемых процессов. Детализация абстрагирует от неточно определенных (из-за скудности информации) аспектов функционирования реальной системы. В описание системы должны входить критерии ее эффективности, альтернативные решения (понимаемые как входы модели или ее части). Выходами модели будут оценки альтернативных решений по заданным критериям эффективности, причем этот процесс итерационен. После оценок альтернатив можно приступать к внедрению результатов моделирования. При этом должны быть найдены основные решения и условия их реализации [3].

Моделирование деятельности робота как сложной системы, помещенной в турбулентную

среду, — более трудная задача, чем моделирование физической системы, поскольку:

- во внешней среде значимы стохастические процессы;
- связи между элементами внешней среды и роботом трудно формализовать;
- неотъемлемой частью таких систем является процесс принятия решений оператором;
- сложно количественно задать поведение входов модели.

На рис. 1 дана схема возможного подхода к построению модели среды, где действует робот, который трактуется здесь как множество взаимосвязанных элементов, объединенных для выполнения некоторой функции. Определение робота как системы субъективно, т. к. зависит не только от цели разработки его модели, но и от суждений системного аналитика.

Такой подход применим и к построению имитационных моделей, агрегированных или детализированных. Имитационному моделированию здесь присуща концепция итеративности: модель меняется через добавление новых или исключение некоторых ее элементов и (или) взаимосвязей между ними.

Главной особенностью боевого робота является его способность к анализу окружающей обстановки в режиме реального времени, корректировке состояний его внутренних систем и учету возможного ее влияния на развитие рисунка боя. Венцом развития таких роботов станет создание интегрированной с ними системы искусственного интеллекта.

Для наглядного представления сложности автоматической кластеризации с помощью алгоритмов ML проведем кластеризацию рассмотренных в данной статье роботов (по отобранным вручную признакам).

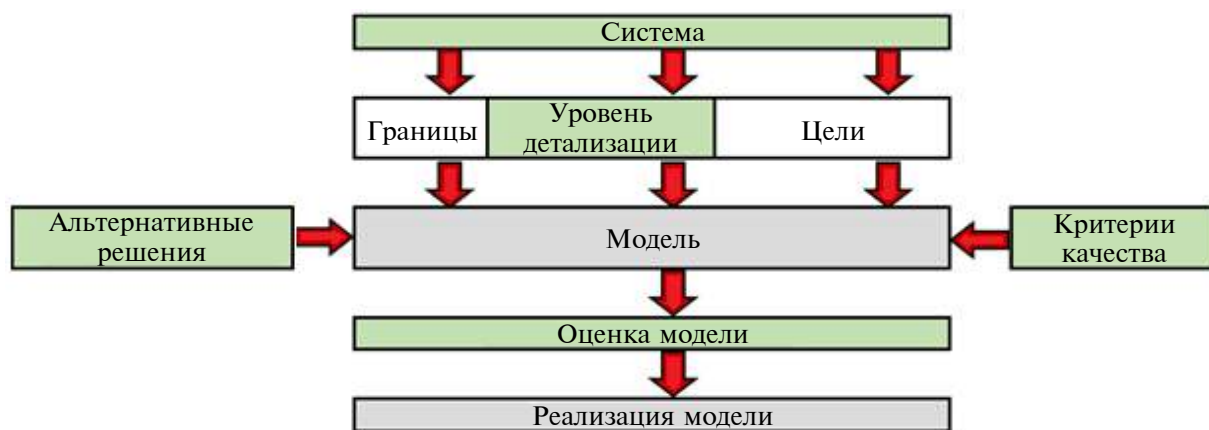


Рис. 1. Процесс построения модели

Выбор этого метода связан с отсутствием достаточного фото- или видеоматериала по каждому роботу для их кластеризации по изображению. Ранее подобные исследования не проводились, отчего нет возможности использовать заранее определенные и испытанные при обучении моделей признаки. Для создания алгоритмической реализации описанной модели применимы такие системы машинного обучения, как MatLab (распространенный ППП для решения вычислительных задач), Seaborn (подключаемая библиотека для Python для визуализации массивов данных) и т. п.

Кластеризация ведется без генерации искусственных признаков, тщательного подбора алгоритма и его гиперпараметров. Это связано с малым числом роботов в выборке и с нехваткой конкретных данных о них. Выделено несколько признаков, определяемых для большинства заявленных роботов: производитель; страна разработки; год последней доработки или изменения; масса изделия в кг; скорость в км/ч; длина изделия; среда действия (воздух, земля, вода и т. д.); живой организм-прототип.

После проведенной предобработки данных можно отобразить рассматриваемые объекты в гиперпространство, где каждая плоскость является конкретным признаком данных. Из-за многомерности пространства нет возможности отобразить данное множество внутри него без изменений. Поэтому был использован алгоритм нелинейного снижения размерности и визуализации многомерных переменных (TSNE). Этот алгоритм снижает размерность до определенного количества плоскостей. В рассматриваемом случае данные были отображены на двумерной плоскости, представленной на рис. 2.

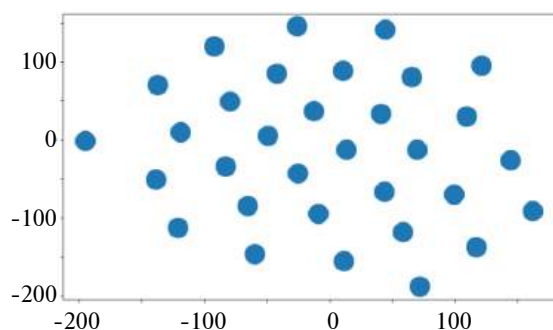


Рис. 2. Представление данных на двумерной плоскости

Каждая точка на рисунке является некоторым из рассматриваемых роботов. Координаты для каждой точки получены алгоритмом на основе группы значений всех признаков. Видно, что на плоскости нет явно выделенных кластеров.

Это может быть связано главным образом с малым количеством признаков. Далее приведены результаты кластеризации данных объектов с помощью нескольких алгоритмов.

Одним из способов автоматического выделения количества кластеров может служить алгоритм кластеризации, который сам определяет оптимальное количество кластеров.

В рамках проводимого исследования использован алгоритм кластеризации методом распространения близости, который способен работать с маленькими выборками. В данном случае он смог выделить четыре кластера. Четыре различных кластера выглядят предпочтительнее для рассматриваемого набора данных.

По проведенному анализу нескольких методов (метод распространения близости, спектральная кластеризация, кластеризация  $k$ -средним) лишь на примере двух последних видно, что есть возможность автоматической кластеризации военных роботов по определенным вручную признакам (см. рис. 3, 4). Однако сложности и неточности в работе остальных приведенных алгоритмов указывают на трудности их применения. Это может быть связано как с малой выборкой кластеризируемых объектов, так и с небольшим количеством их общих признаков для классификации.

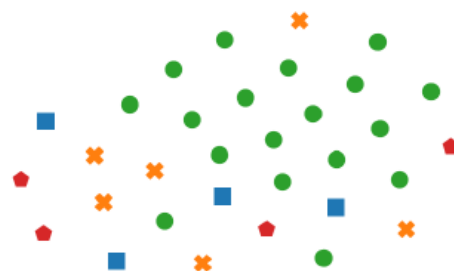


Рис. 3. Спектральная кластеризация

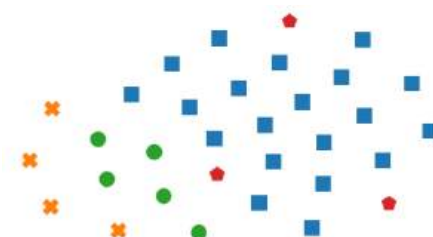


Рис. 4. Кластеризация  $k$ -средним

Код исследования и данные для его воспроизведения есть на GitHub авторов [4].

Разновидности роботов представлены в табл. 1–5.

Таблица 1

Воздушные роботы









	<b>Робот-чайка (SmartBird).</b> Festo's Bionic Learning Network (Германия). Мониторинг, разведка, создание общей конструкции, эффективной с точки зрения ресурсо- и энергопотребления. Масса 0,485 кг; мощность 23 Вт. <b>Весна 2011 г.</b> Разработана автономная летная модель. Прототип завершен [5]
	<b>Робот-ласточка (BionicSwift).</b> Festo's Bionic Learning Network (Германия). Мониторинг, разведка, демонстрация внутренней навигационной системы без камеры. Вес 0,042 кг; размах крыльев 0,68 м; длина тела 0,445 м. <b>2020 г.</b> Прототип создан [6]
	<b>Робот-стрекоза (BionicOpter).</b> Festo's Bionic Learning Network (Германия). Мониторинг, разведка. Вес 0,175 кг; размах крыльев 0,63 м; длина тела 0,44—0,48 м; скорость 20 взмахов/с. <b>2013 г.</b> Прототип создан и запущен в производство [7]
	<b>Робот-бабочка (eMotionButterflies).</b> Festo's Bionic Learning Network (Германия). Мониторинг, разведка. Вес 0,032 кг; размах крыльев 0,5 м; максимальная скорость полета 2,5 м/с; время полета 3—4 мин. <b>2015 г.</b> Прототип создан и запущен в производство [8]
	<b>Робот-летучая мышь (BionicFlyingFox).</b> Festo's Bionic Learning Network (Германия). Мониторинг, разведка. Размах крыльев 2,28 м; длина корпуса 0,87 м; масса — около 0,580 кг. <b>2018 г.</b> Прототип создан и запущен в производство [9]
	<b>Серия птиц Aves.</b> Drone Bird Company (Нидерланды). Отпугивание настоящих птиц. Размах крыльев 2,5 м; скорость 12 м/с. Разработка <b>в течение 30 лет. 2020 г.</b> Прототип создан и запущен в производство. <b>2021 г.</b> Ожидается выпуск степного орла в африканские парки. Возможна аренда [10]









Таблица 2

Наземные роботы

	<b>Робот-гаракан (CRAM).</b> Калифорнийский университет в Беркли (США). Поисково-спасательные операции в обвалившихся зданиях и шахтах. Скорость 50 длин своего тела/с. <b>На 10.02.2016 г.</b> исследователи изучают поведение этих насекомых. На данный момент — в ранней стадии разработки. Стоимость — около \$100 [11]
	<b>Робогусеница.</b> Варшавский университет (Польша). Перемещение объектов, размер которых в 10 раз превосходит размер устройства. Длина 0,015 м. <b>На лето 2016 г.</b> прототип находился в ранней стадии разработки. Прототип не завершен [12]



Наземные роботы

	<b>Робот-тритон (Pleurobot).</b> EPFL — Федеральная политехническая школа Лозанны (Швейцария). Исследование связей между головным и спинным мозгом. Может привести к созданию улучшенных нейропротезов. Скорость невысокая. <b>2015.</b> Прототип создан. Ведутся дальнейшие работы по изучению. Прототип не завершен [13]
	<b>Робопчелы (B-droid).</b> Технологический университет Варшавы (Польша). Опыление растений при сокращении популяции пчел. Размер — около 0,05 м. Прототип существует с <b>2004 г.</b> <b>Лето 2016 г.</b> Проведены испытания. Разработка продолжается. Прототип не завершен [14]
	<b>Робот-комар.</b> Гарвард (США). Разведка завалов, мониторинг качества окружающей среды (анализ качества воздуха и т. д.), военные цели. Вес 0,08 кг; скорость 7200 взмахов/мин. <b>Весна 2013 г.</b> Прототип создан и испытан. Появления на рынках пока не ожидается. Прототип не завершен [15]
	<b>Робот-паук (BionicWheelBot).</b> Festo's Bionic Learning Network (Германия). Разведка местности. Длина тела 0,25 м. <b>2008 г.</b> Появилась идея создания серии роботов. <b>Апрель 2018 г.</b> Прототип представлен на ярмарке Hannover Messe. <b>2020 г.</b> Прототип считается завершенным [16]
	<b>Робот-муравей (BionicANTs).</b> Festo's Bionic Learning Network (Германия). Демонстрация, как автономные отдельные компоненты могут совместно решать сложную задачу, работая как общая сетевая система. Вес 0,105 кг; размер 0,135 м. <b>Весна 2015 г.</b> Прототип завершен. Проведены испытания. Нет новостей о дальнейших разработках [17]
	<b>Робот-кенгуру (BionicKangaroo).</b> Festo's Bionic Learning Network (Германия). Показ машины, использующей естественные принципы как базу технических решений. Вес 7 кг; высота 1 м; прыжок в высоту на 0,4 и 0,8 м по горизонтали; скорость 45,5 км/ч. <b>2012—2013 гг.</b> Прототип в разработке. Проведены испытания. <b>2014 г.</b> Есть планы по модернизации изделия [18]
	<b>Робот-черепаха C-Turtle.</b> Инженеры из Аризоны (США). Поиск наземных мин, оставшихся после боевых действий. Скорость 0,05 м/с. <b>Весна 2017 г.</b> Прототип создан. <b>2020 г.</b> Прототип находится в разработке. Стоимость \$80 [19]
	<b>ATLAS.</b> Boston Dynamics (США). Оказание помощи аварийным службам в различных спасательных операциях. Вес 82 кг; высота 1,5 м; скорость 1,5 м/с. <b>Лето 2013 г.</b> Представлен публике. <b>2015 г.</b> Принимает участие в конкурсе DARPA. <b>2017 г.</b> Улучшены координация и взаимодействие с предметами, добавлены новые функции. Стоимость — около 20 млн долл. [20]

Окончание табл. 2

Наземные роботы


	<p><b>Petman.</b> Boston Dynamics (США). Проверка спецодежды с химической защитой, используемой армией США. Вес 80 кг; скорость 4,5 км/ч. <b>2009 г.</b> Представлен прототип. <b>2011 г.</b> Представлена обновленная версия. <b>2013 г.</b> Проведены испытания. Решение проблемы перехода к автономности. Стоимость 26,3 млн долл. [21]</p>
	<p><b>Robocop.</b> SRI International (Калифорния). Установление контакта с людьми и выявление нарушителей, быстрая оплата штрафов. Вес 100 кг. <b>2017 г.</b> Официально включен в состав полиции Дубая [22]</p>
	<p><b>BigDog.</b> Boston Dynamics при финансировании DARPA (США). Перевоз 154 кг груза, передвижение по различным поверхностям и подъем на наклонную плоскость крутизной до 35°. Вес около 109 кг; скорость 6,5 км/ч; длина робота 0,91 м; максимальная скорость 11 км/ч. <b>2005 г.</b> Прототип создан. <b>Конец 2015 г.</b> Разработчики отказываются от дальнейших работ. Дальнейшие разработки остановлены [23]</p>
	<p><b>Робот-конь Spot.</b> Boston Dynamics (США). Прохождение по сильно пересеченной местности и подъем по лестницам. Вес — примерно 72,5 кг. <b>2015 г.</b> Создан вместо BigDog. Состоялся показ робота. Стоимость 74500 долл. (для коммерческого применения) [24]</p>
	<p><b>Робот-гепард Cheetah.</b> Boston Dynamics по заказу DARPA (США). Эскалация технического потенциала роботов. Возможно использование в военных целях. Вес — около 9 кг; скорость 29 км/ч. <b>2012 г.</b> Прототип заказан руководством ВС США. Проведены первые испытания. <b>2013 г.</b> Прототип создан. Проведены испытания. Ведутся дальнейшие разработки. Прототип не завершен [25]</p>

Таблица 3

Подземные роботы

	<p><b>Робот-дождевой червь.</b> General Electric с поддержкой DARPA (США). Рытье туннелей за оптимальное время. Возможно использование для военных целей. Длина 0,183 м; ширина 0,05 м; скорость 0,1 м/с. <b>Начало 2019 г.</b> Примерная дата начала работы над прототипом. <b>Май 2020 г.</b> Представлен прототип. Проведены полевые испытания. Ведутся дальнейшие разработки. Стоимость 2,5 млн долл [26]</p>
	<p><b>Робот-змея.</b> Tadokoro Laboratory совместно с Международным институтом спасательных работ (IRSI) (Япония). Поисково-спасательные операции (во время стихийных бедствий и катастроф). Вес — около 3 кг; длина 8 м; скорость 0,1 м/с. <b>2008 г.</b> Прототип представлен. <b>2016–2017 гг.</b> В ходе испытаний выявлены недочеты. Внесены улучшения. В течение трех лет планируется массовое использование. Данных о появлении на рынке пока нет [27]</p>

Таблица 4

Космические роботы

	<b>Робот-шимпанзе (iStruct).</b> DFKI GmbH и Бременский университет (Германия). Использование в космической области. Вес 18 кг. <b>15.05.2010—15.08.2013.</b> Прототип в разработке. Официального подтверждения о завершении прототипа не было [28]
	<b>RoboSimian. Robosimian.</b> (NASA Jet Propulsion Laboratory) (США). Использование в условиях космоса или на других планетах. По другой версии — создание робота-спасателя. Высота 0,7 м; вес 125 кг. <b>2012 г.</b> Прототип создан. <b>2015 г.</b> Принял участие в конкурсе DRC2015. <b>Лето 2016 г.</b> Робот сгорел в результате самовоспламенения аккумуляторной батареи. Прототип не завершен [29]
	<b>Робот-гуманоид Valkyrie.</b> NASA (США). Работа на космических станциях. Вес 125—132 кг. <b>Начало 2013 г.</b> Прототип заявлен. <b>Декабрь 2013 г.</b> Прототип создан для конкурса DARPA. Прототип завершен. Стоимость 2 млн долл. [30]

Таблица 5

Водные роботы

	<b>Робот-медуза (AquaJellies 2.0).</b> Festo's Bionic Learning Network (Германия). Сбор и обмен данными в реальном времени. <b>2008 г.</b> Прототип представлен. <b>2013—2014 гг.</b> Ведутся работы над улучшенными технологиями. Прототип не завершен [31]
	<b>Робот-рыба (Airacuda).</b> Юго-Западный государственный университет (Россия). Мониторинг природных и техногенных объектов в гидросфере. Вес 4 кг; длина 0,7 м; максимальная скорость 0,4 м/с. <b>2012—2013 гг.</b> Прототип создан. Планируется сделать робота автономным. Проведены натурные испытания и демонстрация работы перед журналистами. <b>2014 г.</b> Опубликована статья по руководству. Прототип не завершен [32]
	<b>Робот-пингвин (AquaPenguins).</b> Festo's Bionic Learning Network (Германия). Применение в погрузочно-разгрузочной технике. Вес 9,6 кг; скорость 5 км/ч; длина 77 см. <b>2006—2009 гг.</b> Прототип завершен. Проведены испытания [33]

## Водные роботы

	<b>Робот-манта (Aqua-ray).</b> Festo's Bionic Learning Network (Германия). Применение в различных областях морских исследований без ущерба для окружающей среды. Вес 10 кг; скорость 1,8 км/ч; длина 0,615 м. <b>2006—2009 гг.</b> Прототип создан. Проведены испытания [34]
	<b>Робот-акула. Robosea</b> (Китай). Разведка территории. Опционально возможна установка дополнительного оборудования военного назначения. Вес 75 кг; скорость 18,52 км/ч; длина 2 м. <b>2011—2012 гг.</b> Проведены первые испытания. <b>2019 г.</b> Разработка представлена на военно-техническом шоу. На данный момент в статусе "завершено". Стоимость 1000 долл. [35]
	<b>Робот-черепаха Nara-Tartaruga.</b> ETH Zurich (Швейцария). Транспортировка оборудования, наблюдение за подводным миром. Вес 75 кг; скорость 7 км/ч; погружение — до 100 м. <b>2008 г.</b> Сбор данных по планируемой разработке. <b>2012 г.</b> Произведено первое испытание. <b>2016—2020 гг.</b> Прототип не завершен, разработки продолжаются [36]

Очевидно, что ведущая тенденция развития вооруженных сил при ускорении НТП — углубление их роботизации. Роботы создают с целью заменить человека в различных опасных условиях, чтобы повысить его безопасность (пока в основном это касается военной сферы). Применение робототехники эффективно на поле боя для снижения потерь среди личного состава и для увязки всех участников боевых действий в единую информационно-коммуникационную

сеть [37]. Такой подход в полной мере соответствует циклу НОРД (петля Бойда), который был разработан Дж. Бойдом для армии США в целях наблюдения за противником, с последующим выстраиванием преимущественных ответных действий за счет улучшения качества принимаемых решений по сравнению с противником либо за счет повышения скорости своих циклов, позволяющих действовать на опережение неприятеля.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пителинский К. В. Динамика изменений техносферы, биосферы и ноосферы Земли: некоторые результаты применения инновационных технологий // Вестник Московского института лингвистики. 2014. № 2. С. 126—130. <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-izmeneniy-tehnosfery-biosfery-i-noosfery-zemli-nekotorye-rezultaty-primeneniya-innovatsionnyh-tehnologiy>
2. Global Conflict Tracker // [www.cfr.org](http://www.cfr.org) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cfr.org/global-conflict-tracker> (дата обращения: 30.01.2021).
3. Пителинский К. В., Федоров Н. В., Чайчиц А. И., Широкова О. А. Управление информационным контуром вуза и его защита с помощью биометрической идентификации: некоторые методы и средства // Вопросы защиты информации. 2020. № 1(128). С. 19—29.
4. Clustering\_of\_robots // [github.com](https://github.com) [Электронный ресурс]. URL: [https://github.com/Energion-SER/clustering\\_of\\_robots/](https://github.com/Energion-SER/clustering_of_robots/) (дата обращения: 28.01.2021).
5. SmartBird // [www.festo.com](http://www.festo.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.festo.com/group/en/cms/10238.htm> (дата обращения: 30.01.2021).
6. BionicSwift // [www.festo.com](http://www.festo.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.festo.com/group/en/cms/13787.htm> (дата обращения: 30.01.2021).
7. BionicOpter // [www.festo.com](http://www.festo.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.festo.com/group/en/cms/10224.htm> (дата обращения: 30.01.2021).



8. eMotionButterflies // [www.festo.com](http://www.festo.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.festo.com/group/en/cms/10216.htm> (дата обращения: 30.01.2021).
9. BionicFlyingFox // [www.festo.com](http://www.festo.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.festo.com/group/en/cms/13130.htm> (дата обращения: 30.01.2021).
10. AVES | The Drone Bird Company // [www.thedronebird.com](http://www.thedronebird.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thedronebird.com/aves/> (дата обращения: 30.01.2021).
11. Роботараканы спасут людей из-под завала // [robotrends.ru](http://robotrends.ru) [Электронный ресурс]. URL: <http://robotrends.ru/pub/1606/robo-tarakany-spasut-lyudyay-iz-pod-zavala> (дата обращения: 30.01.2021).
12. В Польше разработали бионическую робогусеницу // [robotrends.ru](http://robotrends.ru) [Электронный ресурс]. URL: <http://robotrends.ru/pub/1634/v-polshe-razrabotali-bionicheskuyu-robogusenicu> (дата обращения: 30.01.2021).
13. A new robot mimics vertebrate motion // [actu.epfl.ch](http://actu.epfl.ch) [Электронный ресурс]. URL: <https://actu.epfl.ch/news/a-new-robot-mimics-vertebrate-motion-2/> (дата обращения: 30.01.2021).
14. Робопчелы // [robotrends.ru](http://robotrends.ru) [Электронный ресурс]. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/robopchely> (дата обращения: 30.01.2021).
15. В Гарварде создали миниатюрного робота-комара // [habr.com](http://habr.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/178645/> (дата обращения: 30.01.2021).
16. BionicWheelBot // [www.festo.com](http://www.festo.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.festo.com/group/en/cms/13129.htm> (дата обращения: 30.01.2021).
17. BionicANTs // [www.festo.com](http://www.festo.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.festo.com/group/en/cms/10157.htm> (дата обращения: 30.01.2021).
18. BionicKangaroo // [www.festo.com](http://www.festo.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.festo.com/group/en/cms/10219.htm> (дата обращения: 30.01.2021).
19. Робот-черепаха C-Turtle будет искать мины в пустыне // [newsrussia.media](http://newsrussia.media) [Электронный ресурс]. URL: <https://newsrussia.media/tehnologii/8043-robot-cherepaha-c-turtle-budet-iskat-miny-v-pustyne.html> (дата обращения: 30.01.2021).
20. ATLAS® | Boston Dynamics // [www.bostondynamics.com](http://www.bostondynamics.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bostondynamics.com/atlas> (дата обращения: 30.01.2021).
21. Потрясающий Робот-Гуманоид "Petman" От "Boston Dynamics" // [www.epwr.ru](http://www.epwr.ru) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.epwr.ru/interesting/261/> (дата обращения: 30.01.2021).
22. Робокот в Дубае // [amarok-man.livejournal.com](http://amarok-man.livejournal.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://amarok-man.livejournal.com/1961619.html> (дата обращения: 30.01.2021).
23. BigDog — робот-собака для американских военных // [androbots.ru](http://androbots.ru) [Электронный ресурс]. URL: [http://androbots.ru/roboty\\_budushego/Big\\_Dog/BigDog.php](http://androbots.ru/roboty_budushego/Big_Dog/BigDog.php) (дата обращения: 30.01.2021).
24. Робот-лошадь от Boston Dynamics // [roboting.ru](http://roboting.ru) [Электронный ресурс]. URL: <http://roboting.ru/1944-robot-loshad-ot-boston-dynamics.html> (дата обращения: 30.01.2021).
25. Робот-гепард — марафонист // [androbots.ru](http://androbots.ru) [Электронный ресурс]. URL: [http://androbots.ru/roboty\\_budushego/darpa\\_cheetah/robot-gepard.php](http://androbots.ru/roboty_budushego/darpa_cheetah/robot-gepard.php) (дата обращения: 30.01.2021).
26. Dig This: GE Engineers Learned from Worms How to Build Underminer, A Tunneling Robot Funded by DARPA // [www.ge.com](http://www.ge.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ge.com/news/reports/dig-this-ge-engineers-learned-from-worms-how-to-build-underminer-a-tunneling-robot-funded-by-darpa> (дата обращения: 30.01.2021).
27. Робот-змея из Японии поможет в поисково-спасательных операциях // [robotrends.ru](http://robotrends.ru) [Электронный ресурс]. URL: <http://robotrends.ru/pub/1725/robot-zmeya-iz-yaponii-pomozhet-v-poiskovo-spasatelnyh-operaciyah> (дата обращения: 30.01.2021).
28. iStruct Intelligent Structures for Mobile Robots // [robotik.dfki-bremen.de](http://robotik.dfki-bremen.de) [Электронный ресурс]. URL: <https://robotik.dfki-bremen.de/en/research/projects/istruct.html> (дата обращения: 30.01.2021).
29. RoboSimian // [robotrends.ru](http://robotrends.ru) [Электронный ресурс]. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/robosimian> (дата обращения: 30.01.2021).
30. NASA представило Valkyrie — гуманоидного робота, который будет участвовать в финале конкурса DARPA // [habr.com](http://habr.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/206130/> (дата обращения: 30.01.2021).
31. AquaJellies 2.0 // [www.festo.com](http://www.festo.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.festo.com/group/en/cms/10227.htm> (дата обращения: 30.01.2021).
32. Лушников Б. В., Политов Е. Н., Тарасова Е. С., Казарян К. Г. Бионический плавающий робот для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере // Cloud of Science. 2014. № 1. С. 77. <https://cyberleninka.ru/article/n/bionicheskiy-plavayushchiy-robot-dlya-monitoringa-prirodnyh-i-tehnogennyh-obektov-v-gidrosfere>
33. AquaPenguins // [www.festo.com](http://www.festo.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.festo.com/group/en/cms/10243.htm> (дата обращения: 30.01.2021).
34. Aqua\_ray // [www.festo.com](http://www.festo.com) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.festo.com/group/en/cms/10246.htm> (дата обращения: 30.01.2021).

35. ROBO-SHARK // [www.robossea.org](http://www.robossea.org) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.robossea.org/sanguanjie.html> (дата обращения: 30.01.2021).

36. Робот-черепаха // [timerobots.ru](https://timerobots.ru) [Электронный ресурс]. URL: <https://timerobots.ru/robots/423-robot-cherepaha.html> (дата обращения: 30.01.2021).

37. **Пителинский К. В.** Циклическое управление сложными социоэкономическими системами и формирование лидеров трансформационного типа в условиях транзита европейской культуры // Вестник московской международной академии. 2019. № 1. С. 98—116. <https://cyberleninka.ru/article/n/tsiklichesкое-upravlenie-slozhnymi-sotsio-ekonomicheskimi-sistemami-i-formirovanie-liderov-transformatsionnogo-tipa-v-usloviyah>

## **CLASSIFICATION OF BIONIC ROBOTICS AND A REVIEW OF SOME OF ITS FOREIGN SAMPLES**

*K. V. Pitelinskiy, N. V. Fedorov, S. O. Makovey, M. P. Sigida*  
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

*Modern types of robotic systems based on bionic principles of operation are considered. Possible ways of their classification are given. On the basis of the conducted analysis, the conclusion is made about the prospects of wide application of such systems in modern realities for various practical applications.*

*Keywords:* robotics, bionic principles of motion, animal-like robots, cybernetics, cyclic control, NORD cycle, simulation.

Bibliography — 37 references.

*Received April 8, 2021*

УДК 541.136

DOI: 10.52190/1729-6552\_2021\_3\_51

## ЛЕГИРОВАНИЕ КАТОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Е. Ю. Лушпа, канд. техн. наук

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

*Проведено изучение катодных материалов состава  $\text{LiNiPO}_4$  и  $\text{LiNiPO}_4$  легированного лантаном. Выполнены их рентгеноструктурный анализ, инфракрасный анализ с преобразованием Фурье для подтверждения образования  $\text{Li}_{1-y}\text{La}_y\text{NiPO}_4$  ( $y = 0,05, 0,07, 0,09$  мол. %) и анализ импеданса на переменном токе.*

*Ключевые слова:* катодный материал, лантан, литий-ионный аккумулятор, металлы редкоземельной группы.

Экономика находится в кризисной ситуации из-за зависимости от невозобновляемых источников энергии. В последние пять лет значительный интерес проявляется к использованию катодных материалов для литий-ионных аккумуляторов с высокими емкостью, безопасностью и надежностью. Ортофосфаты лития  $\text{LiMPO}_4$  ( $M = \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Co}, \text{Ni}$  и т. д.) представляют большой интерес для ученых в качестве катода для использования в литий-ионных батареях [1].

Оливин-фосфатные катодные материалы тщательно изучались в качестве высокоэнергетических и высокопотенциальных катодов для литий-ионных батарей из-за их нетоксичности, экономической эффективности, экологичности, надежности даже при циклах перезарядки и лучшей термической стабильности во время зарядки и разрядки [1]. Одна из основных проблем оливин-фосфатных катодных материалов заключается в их низкой скорости, что объясняется слабой электронной и ионной проводимостью и медленной кинетикой диффузии ионов лития через границы раздела  $\text{LiMPO}_4$ — $\text{MPO}_4$ . Были применены различные подходы к решению этой проблемы. Уменьшение размера частиц путем изменения углеродного покрытия и легирования решетки ионами сверхвалентных металлов считается эффективным способом улучшения электрохимических свойств фосфатов металлического лития [1].

Исследования [2] показали, что контролируемая катионная нестехиометрия в сочетании с

легированием твердого раствора металлами, сверхвалентными по отношению к  $\text{Li}^+$ , увеличивает электронную проводимость  $\text{Li}_{0,99}\text{D}_{0,01}\text{FePO}_4$  ( $D = \text{Nb}, \text{Zr}, \text{Mg}, \text{Ti}$ ). Редкоземельные материалы, такие, как иттрий, лантан, европий и т. д., использовались в качестве легирующих добавок при получении катодных материалов  $\text{LiMPO}_4$  ( $M = \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Co}, \text{Ni}$  и т. д.) для улучшения их ионной проводимости.

Исследование [3] показало, что замещение редкоземельных ионов в позиции Li в  $(\text{LiY})\text{FePO}_4$  улучшает ионную проводимость. В  $\text{LiFePO}_4$  было добавлено небольшое количество ионов лантана путем твердофазного синтеза. Обнаружено, что легирование этими ионами может улучшить емкость и характеристики. Проведено исследование катодных материалов нелегированного  $\text{LiNiPO}_4$  и  $\text{LiNiPO}_4$ , легированного иттрием и европием  $\text{LiNiPO}_4$  [3], полученных методом полимеризуемого прекурсора типа Печини. Обнаружено, что ионная проводимость  $\text{LiNiPO}_4$  ( $9,34 \cdot 10^{-9}$  См) увеличивается примерно на два порядка за счет легирования иттрием и на один порядок за счет легирования европием при комнатной температуре.

В исследовании, проведенном автором, предпринята попытка изучить влияние редкоземельного металла лантана (La) на структурные, колебательные и электрические свойства катодного материала  $\text{LiNiPO}_4$ , полученного методом прекурсора типа Печини.

### Экспериментальная часть: получение $\text{LiNiPO}_4$ , легированного La

Катодные материалы (чистый  $\text{LiNiPO}_4$  и легированный различными концентрациями лан-

Лушпа Евгений Юрьевич, профессор кафедры "РВСН ВУЦ".

E-mail: euglushpa@list.ru

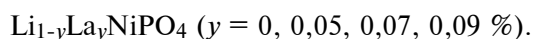
Статья поступила в редакцию 7 мая 2021 г.

© Лушпа Е. Ю., 2021



тана  $\text{LiNiPO}_4$  в молекулярных концентрациях в процентном соотношении) были приготовлены методом прекурсоров типа Печини с использованием высокочистого сырья. Для приготовления  $\text{LiNiPO}_4$  растворяли  $\text{LiNO}_3$ ,  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  в бидистиллированной воде. В случае легированного лантаном  $\text{LiNiPO}_4$  добавляли гексагидрат нитрата лантана ( $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) в различных молярных концентрациях.

Лимонную кислоту и этиленгликоль в молярном соотношении 0,2:0,2 добавляли к указанному солевому раствору для гелеобразования при интенсивном перемешивании. Раствор упаривали на горячей плите. Извлеченный черный порошок измельчали в мелкодисперсный порошок и прокаливали при 800 °С, выдерживая его в тигле с кремнеземом в течение 8 ч в муфельной печи с образованием желтого порошка. Были приготовлены составы катодного материала [4] по следующему соотношению:



Эти образцы были охарактеризованы с использованием методов дифракции рентгеновских лучей (ДРЛ), инфракрасного преобразования Фурье (ИК-спектроскопия) и комплексной импедансной спектроскопии.

Приготовленные нелегированные порошки  $\text{LiNiPO}_4$  и  $\text{LiNiPO}_4$ , легированные La, имеют желтый цвет. Дифрактограммы катодных материалов записывали на рентгеновском дифрактометре с  $\text{CuK}\alpha$ -излучением ( $\lambda = 0,154 \text{ нм}$ ) с шагом сканирования 3,1750. Инфракрасные (ИК) спектры записывали в режиме пропускания с помощью спектрофотометра при температуре окружающей среды. Для измерения проводимости порошок был спрессован (давление ~ 1,2 т), чтобы сформировать таблетку (толщиной ~ 1 мм и диаметром 10 мм). Измерения переменного тока проводили с помощью анализатора импеданса при комнатной температуре в диапазоне частот от 42 Гц до 1 МГц [5].

### Результаты рентгеноструктурного анализа

Рентгеноструктурный анализ используется для анализа параметров структуры, таких, как параметры и объем элементарной ячейки. Знание таких параметров, особенно в случае новых материалов, необходимо для поиска их технических применений. На рис. 1 показаны дифрактограммы нелегированных  $\text{LiNiPO}_4$  и  $\text{LiNiPO}_4$ ,

допированных различными концентрациями La. На дифрактограммах всех образцов показан однофазный  $\text{LiNiPO}_4$  с орторомбической структурой оливина.

На изображениях видно, что все дифракционные пики очень сильные, что свидетельствует о хорошей кристаллической структуре образца [5]. Значения основных дифракционных пиков хорошо согласуются с заявленными значениями.

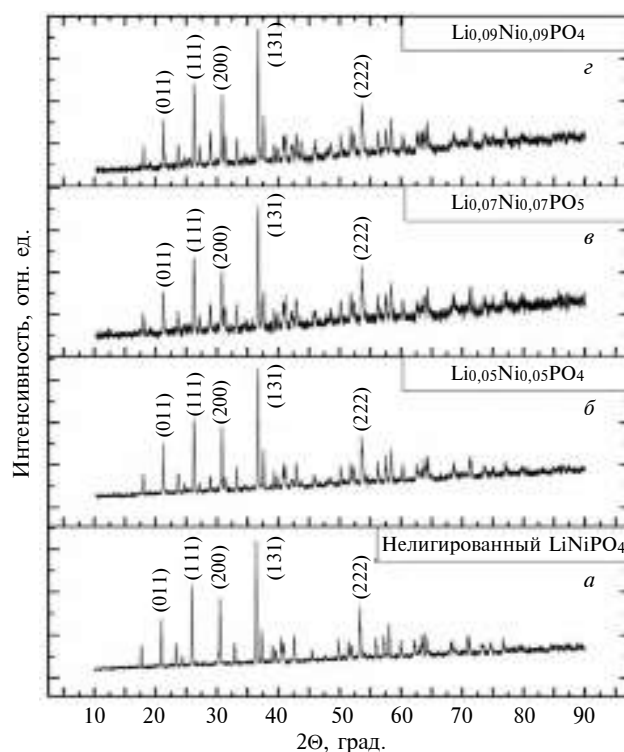


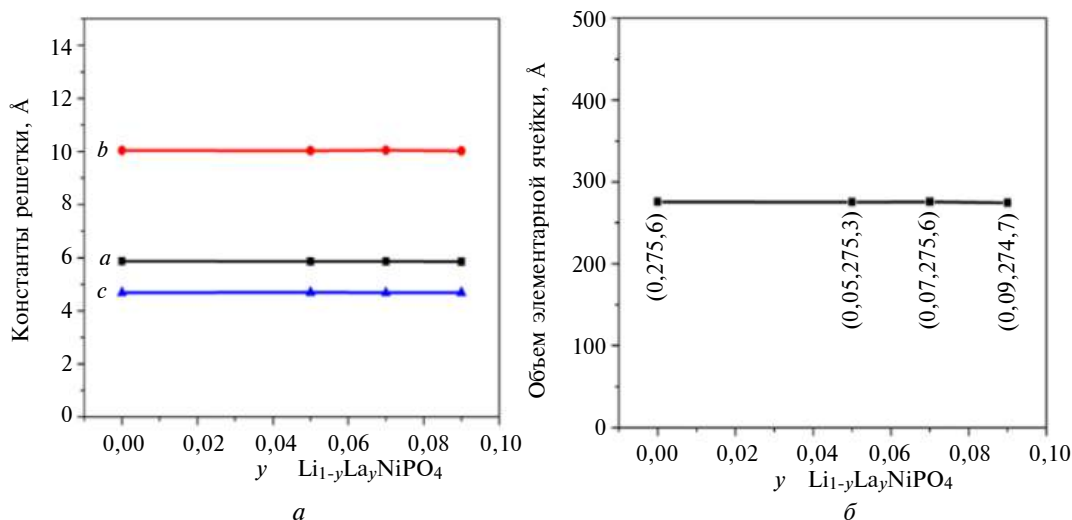
Рис. 1. Рентгенограммы нелегированного  $\text{LiNiPO}_4$  (а) и  $\text{LiNiPO}_4$ , легированного La (б–г)

Параметры элементарной ячейки (постоянные решетки) и объемы элементарной ячейки для ряда  $\text{Li}_{1-y}\text{La}_y\text{NiPO}_4$  ( $y = 0, 0,05, 0,07, 0,09$  мол. %) рассчитывали с использованием программного обеспечения. Эти значения объединены в табл. 1 и показаны на рис. 2, а и б. Эффект легирования увеличивает или уменьшает параметры решетки в зависимости от природы легирующего иона и количества легирования [5]. Видно, что легирование лантаном не изменяет кристаллическую структуру, но уменьшает параметр решетки вдоль оси  $a$  и увеличивает вдоль оси  $c$  в  $\text{LiNiPO}_4$ , поскольку  $\text{Li}^+$  в решетке частично замещается на  $\text{La}^{3+}$ , что благоприятно для передачи ионов Li, поскольку радиус  $\text{Li}^+$  (0,076 нм) меньше, чем  $\text{La}^{3+}$  (0,1016 нм).

Таблица 1

Параметры решетки и объем элементарной ячейки для всех соединений

Соединение	$a$ , Å	$b$ , Å	$c$ , Å	Объем элементарной ячейки, Å <sup>3</sup>
LiNiPO <sub>4</sub>	5,869	10,034	4,681	275,6
Li <sub>0,95</sub> La <sub>0,05</sub> NiPO <sub>4</sub>	5,860	10,027	4,686	275,3
Li <sub>0,93</sub> La <sub>0,07</sub> NiPO <sub>4</sub>	5,861	10,044	4,682	275,6
Li <sub>0,91</sub> La <sub>0,09</sub> NiPO <sub>4</sub>	5,855	10,017	4,684	274,7


 Рис. 2. Изменение параметров (а) и объема (б) элементарной ячейки в зависимости от  $y$  в  $\text{Li}_{1-y}\text{La}_y\text{NiPO}_4$ 

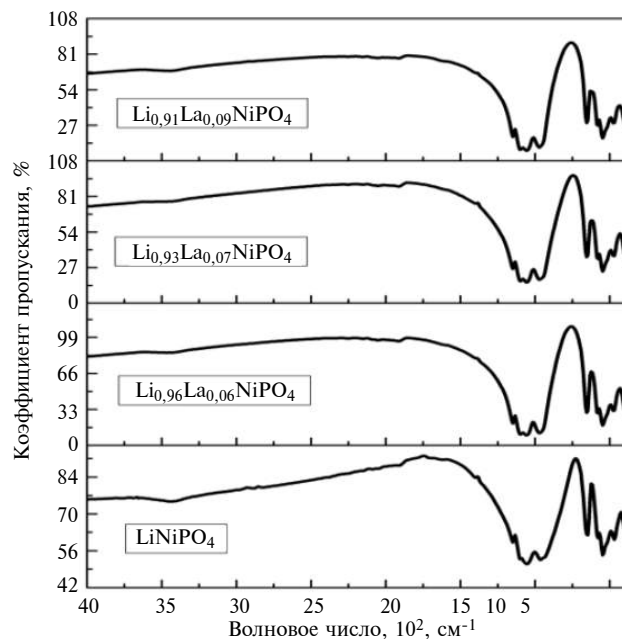
### Анализ: спектроскопия в инфракрасной области (ИК-спектроскопия)

На рис. 3 показаны ИК-спектры нелегированных  $\text{LiNiPO}_4$  и  $\text{LiNiPO}_4$ , легированных различными концентрациями La, с волновым числом от 400 до 4000  $\text{cm}^{-1}$ , записанные при комнатной температуре. Полосы, наблюдаемые в области 1400–400  $\text{cm}^{-1}$ , характерны для фосфат-иона  $[\text{PO}_4]^{3-}$ , находящегося в свободном состоянии с тетраэдрической симметрией.

Пик при 393  $\text{cm}^{-1}$  в основном обусловлен трансляционными модами связей Ni–O. Пики при 471–478  $\text{cm}^{-1}$  приписываются колебаниям связей Li–O. Интенсивность указанного пика значительно уменьшается при извлечении Li из решетки оливина. Пик при 548  $\text{cm}^{-1}$  приписывается компоненту, происходящему из моды  $2(\text{PO}_4)$ , а пики при 648–656  $\text{cm}^{-1}$  в основном соответствуют компонентам, происходящим из моды  $4(\text{PO}_4)$ ;  $\nu_2$  и  $\nu_4$  включают симметричные и антисимметричные режимы изгиба связей [6].

Пики, наблюдаемые при 964–1150  $\text{cm}^{-1}$ , связаны с модой растяжения тетраэдрального  $3(\text{PO}_4)$ ;  $\nu_3$  включает антисимметричную моду растяжения связей P–O. Характерные пики при 471, 648, 964  $\text{cm}^{-1}$ , наблюдаемые для нелегированного  $\text{LiNiPO}_4$ , смещены до 478, 656, 972  $\text{cm}^{-1}$ , соответственно, для  $\text{LiNiPO}_4$ , легированного La.

Изменения интенсивности пиков наблюдались на ИК-диаграммах легированного La  $\text{LiNiPO}_4$  по сравнению с нелегированным  $\text{LiNiPO}_4$ . Таким образом, ИК-анализ подтверждает образование  $\text{LiNiPO}_4$ , легированного La.


 Рис. 3. ИК-Фурье-спектры нелегированных  $\text{LiNiPO}_4$  и  $\text{LiNiPO}_4$ , легированных различными концентрациями La

### Анализ импеданса

На рис. 4 показаны графики Коула-Коула (или графики Найквиста) для серии образцов  $\text{Li}_{1-y}\text{La}_y\text{NiPO}_4$  ( $y = 0, 0,05, 0,07, 0,09$  мол. %), приготовленных методом прекурсоров типа Печини при комнатной температуре.

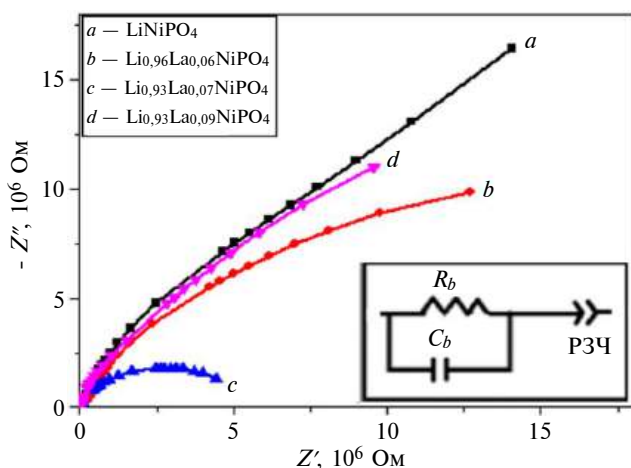


Рис. 4. Графики Найквиста для всех образцов при комнатной температуре (303 К), РЗЧ-равновесие заряженных частиц

Графики состоят из полуокружностей для  $\text{LiNiPO}_4$ , легированного La, и высокочастотного полуокружия и низкочастотного всплеска для нелегированного  $\text{LiNiPO}_4$ . Эти полуокружности обусловлены параллельным сочетанием объемного сопротивления  $R_b$  и объемной емкости  $C_b$  материалов. Вогнутый полуокруг указывает на несовершенства материала, а острый возникает из-за эффекта блокировки электродов. Также на рис. 4 приведена эквивалентная схема для графика импеданса  $\text{LiNiPO}_4$ . Значения объемного сопротивления  $R_b$  получены из низкочастотной точки пересечения полуокружия на реальной оси  $Z'$  с использованием программного обеспечения, разработанного для анализа данных импеданса. Значения ионной проводимости  $\sigma$  рассчитывали по уравнению [6]

$$\sigma = \frac{L}{R_b} A, \quad (1)$$

где  $L$ ,  $A$ ,  $R_b$  — толщина ( $\text{см}^{-1}$ ), площадь ( $\text{см}^{-2}$ ) и объемное сопротивление (Ом) соответственно.

Значения проводимости для всех образцов при 303 К представлены в табл. 2. Электропроводность нелегированного  $\text{LiNiPO}_4$  при комнатной температуре оказалась равной  $8,13 \cdot 10^{-9}$  См, что хорошо согласуется с проводимостью того же образца. В методе прекурсора типа Печини

образцы  $\text{LiNiPO}_4$ , легированные различными концентрациями La на позиции Li, показали улучшенную на порядок проводимость. Причина этого состоит в том, что легирование лантаном может уменьшить размер зёрен, снизить диффузионное сопротивление  $\text{Li}^+$ . Кроме того, пропитка лантаном приводит к созданию свободного места для ионов лития, что способствует диффузии ионов лития, а лантан может снизить силу взаимодействия между  $\text{Li}^+$  и  $\text{Li}^+$ , что облегчает интеркаляцию (деинтеркаляцию)  $\text{Li}^+$ . Аналогичный эффект наблюдался в  $\text{LiFePO}_4$ , легированном лантаном, легированном иттрием и допированном иттрием. Образец с 0,07 мол. %  $\text{LiNiPO}_4$ , легированного La на позиции Li, имеет максимальную проводимость  $3,83 \cdot 10^{-8}$  См при 303 К. Отмечено, что легирование лантаном улучшает проводимость  $\text{LiNiPO}_4$  [7].

Таблица 2

Значения электропроводности всех материалов катода при комнатной температуре

$\text{Li}_{1-y}\text{La}_y\text{NiPO}_4$	Электропроводность, См
$y$	
0	$8,13 \cdot 10^{-9}$
0,05	$1,38 \cdot 10^{-8}$
0,07	$3,83 \cdot 10^{-8}$
0,09	$7,19 \cdot 10^{-9}$

### Заключение

Нанокатодные материалы на основе  $\text{LiNiPO}_4$  и  $\text{LiNiPO}_4$ , легированного La на позициях Li, были приготовлены методом прекурсоров типа Печини и исследованы на структурные, колебательные и электрические свойства [8]. Рентгенограммы образцов подтверждают однофазное образование и ромбическую кристаллическую структуру. ИК-спектры образцов содержат характерные пики для иона  $[\text{PO}_4]^{3-}$ , симметричный изгиб Li—O и изгиб Ni—O, сдвиги и изменения интенсивности характеристических пиков поглощения для  $\text{LiNiPO}_4$ , легированного La, по сравнению с нелегированным  $\text{LiNiPO}_4$ , что подтверждает образование  $\text{LiNiPO}_4$ , легированного La.

Комплексная импедансная спектроскопия показывает, что 0,07 мол. % La, легированного на Li-позиции в  $\text{LiNiPO}_4$ , улучшили проводимость более чем на порядок [9]. Доказано, что образец  $\text{Li}_{0,93}\text{La}_{0,07}\text{NiPO}_4$  имеет лучшую проводимость ( $3,83 \cdot 10^{-8}$  См при 303 К), чем все остальные образцы. Этот оптимизированный образец  $\text{Li}_{0,93}\text{La}_{0,07}\text{NiPO}_4$  оказался лучшим выбором в качестве материала катода в литий-ионных батареях для нового поколения смартфонов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Садовников А. В., Макачук В. В. Литий-ионные аккумуляторы // Молодой ученый. 2016. № 23(127). С. 84—89. <https://moluch.ru/archive/127/35051/>
2. Maynard A. D., Robert J. A., Butz T., Colvin V., Donaldson K., Oberdörster G. et al. Safe handling of nanotechnology. Nature // 2018. P. 23—45.
3. Дюжев Н. А., Демин Г. Д., Грязнева Т. А., Пестов А. Е., Салащенко Н. Н., Чхало Н. И., Пудонин Ф. А. Микрофокусные рентгеновские трубки с кремниевым автоэмиссионным нанокатодом как источник рентгеновского излучения // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2017. № 12. С. 56—63.
4. Feng L., Xuan Z., Zhao H., Bai Y., Guo J., Su C.—W., Chen X. MnO<sub>2</sub> prepared by hydrothermal method and electrochemical performance as anode for lithium-ion battery // Nanoscale Res. Lett. 2017. № 9. P. 290.
5. Горелик Е. В., Екимова Т. А. Рентгенографическое исследование дефектной структуры кристаллов ниобата лития, легированных магнием // Тр. Кольского научного центра РАН. 2018. № 2-2. С. 584—588.
6. Калытка В. А. Исследование диаграмм Коула-Коула магнитных диэлектриков // Евразийский союз ученых. 2015. № 8-3(17). С. 90—94.
7. Кулова Т. Л., Скундин А. М. Проблемы низкотемпературных литий-ионных аккумуляторов // Электрохимическая энергетика. 2017. № 2. С. 61—88.
8. Brog J. P., Crochet A., Seydoux J. et al. Characteristics and properties of nano-LiCoO<sub>2</sub> synthesized by pre-organized single source precursors: Li-ion diffusivity, electrochemistry and biological assessment // J. Nanobiotechnol. 2017. № 15. P. 58. <https://doi.org/10.1186/s12951-017-0292-3>
9. Корнилов Д. Ю., Губин С. П. Анодные материалы на основе графена для литий-ионных аккумуляторов // РЭНСИТ. 2016. №1. С. 39—48.

## ALLOYING WITH RARE EARTH METALS TO INCREASE THE CAPACITIVE PROPERTIES OF LITHIUM-ION BATTERIES

E. Yu. Lushpa

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*The study of LiNiPO<sub>4</sub> and LiNiPO<sub>4</sub> doped with lanthanum has been carried out. Their X-ray diffraction analysis, infrared analysis with Fourier transform to confirm the formation of Li<sub>1-y</sub>La<sub>y</sub>NiPO<sub>4</sub> (y = 0.05, 0.07, 0.09 mol %) and impedance analysis on alternating current were performed.*

**Keywords:** cathode material, lanthanum, lithium-ion battery, rare-earth metals.

Bibliography — 9 references.

Received May 7, 2021

## **АНТИРОССИЙСКИЕ САНКЦИИ: РИСКИ И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

А. А. Крюков, Д. С. Джепа

АО "Концерн ВКО "Алмаз-Антей", Москва, Россия

*Представлены стратегические цели антироссийских санкций в высокотехнологичном комплексе и риски его дальнейшего устойчивого развития. Проведен анализ экспорта и импорта продукции машиностроения и оборонно-промышленного комплекса в условиях санкций. Дана оценка мероприятий по приостановлению и прекращению военного сотрудничества с Россией. Рассмотрены основные результаты программ импортозамещения в России в ответ на санкционные мероприятия. Представлены основные достижения и позитивные результаты антироссийских санкций в оборонно-промышленном комплексе, в частности диверсификация заказчиков на мировом рынке, повышение конкурентоспособности отечественной продукции. Предложены стратегические направления восстановления производственного, научно-технического и технологического потенциала и инновационного развития наукоемких высокотехнологичных производств российского оборонно-промышленного комплекса.*

*Ключевые слова:* санкции, риски и возможности, высокотехнологичный комплекс, оборонно-промышленный комплекс.

Основная цель введения США в марте 2014 г. санкций против Российской Федерации заключается в международной изоляции страны, ослаблении ее экономики, сокращении доходов. Страны ЕС присоединились к США, запретив инвестиции в российские проекты развития транспорта, инфраструктуры, телекоммуникаций, машиностроения, топливно-энергетического комплекса, а также поставку оборудования. Российским акционерным обществам перестали быть доступны финансовые ресурсы на мировых рынках капитала. Страны ЕС и США запретили импорт из России более 250 наименований товаров [1].

По мнению Плотникова В. А., стратегическая цель антироссийских санкций заключается в уничтожении высокотехнологичного комплекса российской экономики, что приведет к окончательной потере экономического суверенитета страны. Результатом станет доступ мировых корпораций ведущих стран мира к российским

ресурсам и возможность их нерыночной экспроприации с дальнейшей реализацией на конкурентных условиях и извлечением сверхприбыли [1].

В Глобальном инновационном индексе в 2020 г. Россия заняла 47-е место, опустившись на один пункт по сравнению с предыдущим годом [2]. Высокотехнологичный комплекс формирует инновационный базис отечественной промышленности. В оборонно-промышленном комплексе (ОПК) удельный вес инновационно-активных предприятий составил 46 %. ОПК, в дополнение к энергомашиностроению, микробиологии и высокотехнологичной химии, характеризуется высокой конкурентоспособностью наряду с перспективными био- и нанотехнологиями, высоким экспортным потенциалом [3]. Именно ОПК является инновационно-технологическим ядром машиностроения России.

Стратегическое значение ОПК в обеспечении экономического роста заключается в высокой наукоемкости и технологичности выпускаемой продукции, стабильном и активном внедрении инновационных разработок и технологий, высоком качестве и эксплуатационных характеристиках вооружения и военной техники (ВВТ). Конкурентоспособность российского ОПК зависит от бюджетного финансирования и других форм и инструментов государственной поддержки, что предопределяет зависимость оборонных предприятий от государственного заказа и суще-

---

**Крюков Алексей Анатольевич**, заместитель руководителя аппарата генерального директора.

E-mail: kryukov.a\_almaz@bk.ru

**Джепа Дмитрий Сергеевич**, руководитель аппарата генерального директора.

E-mail: jepa.d\_almaz@bk.ru

---

*Статья поступила в редакцию 8 апреля 2021 г.*

© Крюков А. А., Джепа Д. С., 2021

ственные риски реализации проектов. Вместе с тем для них созданы уникальные условия научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, производственного процесса. В условиях напряженной геополитической ситуации ОПК обеспечивает национальную и военную безопасность, а также формирует вектор инновационно-технологического развития экономики и стратегические интересы России на глобальных рынках высокотехнологичных изделий.

### Основная часть

Санкции против ОПК нацелены на ограничение доступа российских оборонных корпораций к международным рынкам, где они успешно противостоят конкурентам из США, Франции, Великобритании и других стран. По информации ЦАМТО, в 2011–2018 гг. Россия находилась на 2-м месте по экспорту вооружений (сумма заказов на разработку и поставку вооружений составила 93,940 млрд долл., или 11,7 %, в структуре всемирного портфеля контрактов), уступая лишь США (367,636 млрд долл., или 45,7 %) [4]. Спад объемов экспорта ОПК из-за антироссийских санкций может привести к тому, что часть мирового рынка высокотехнологичной военной продукции займут сильные конкуренты.

Вследствие западных санкций в ОПК запрещено финансирование трех оборонных концернов: АО "Концерн "Уралвагонзавод", ОАО "ОПК "Оборонпром", ПАО "ОАК". В санкционный список включены компании АО "Концерн "Калашников", ОАО "Концерн "Сириус", концерн "Станкоинструмент", АО "РТ-Химкомпозит", ПАО "Тульский оружейный завод", АО "Научно-производственный концерн "Технологии машиностроения", АО "НПО "Высокоточные комплексы", АО "Концерн ВКО "Алмаз-Антей" и АО "НПО "Базальт". Деятельность оборонных концернов характеризуется повышенными рисками, которые усиливаются в условиях антироссийских санкций. Заблокированы активы пяти оборонных предприятий: АО "НИИП имени В. В. Тихомирова", ОАО "Мытищинский машиностроительный завод", АО "Концерн ВКО "Алмаз-Антей", ПАО "Машиностроительный завод имени М. И. Калинина" и ПАО "Долгопрудненское научно-производственное предприятие" [5]. С 2020 г. Государственный департамент США ввел ограничения на сотрудничество с ВПК "НПО Машиностроения", Кумертауским авиационным производственным предприятием и КБП имени Шипунова в Туле [6]. Тенденции к снижению санкционного давления не наблюдаются.

Очевидно, международная экономическая изоляция и последующий за ней ущерб экономике с помощью санкций нацелены на ослабление финансовой системы, высокотехнологичного, и прежде всего оборонно-промышленного, комплекса России, ограничение доступа к научным исследованиям, инновационным технологиям и разработкам, прекращение или приостановление реализации совместных проектов в научно-инновационной сфере. Еще в начале 2014 г. США и ряд других стран приостановили или завершили военное сотрудничество с Россией. Так, Правительство США приостановило реализацию американско-российских инвестиционных проектов в сфере проектирования и выпуска ВВТ, запретило американский экспорт в Россию высокотехнологичных изделий, усиливающий боеспособность ВКС России. Были аннулированы ранее действующие лицензии на их поставку. Прекратили полностью сотрудничество с Россией в сфере торговли, проектирования и разработки ВВТ Канада, Израиль, Швеция. Норвегия, Украина, Нидерланды приостановили военное сотрудничество с Россией с 2014 г. Великобритания заморозила экспорт ВВТ британского производства в Россию и другие формы двустороннего военного сотрудничества, приостановила действие всех экспортных лицензий на ВВТ и продукцию двойного назначения. Германия заморозила исполнение военного контракта с Россией стоимостью 120 млн евро, прекратила экспорт ВВТ в Россию [7].

Существенные проблемы и риски антироссийские санкции создали в космической промышленности. Прекращено сотрудничество корпорации "Роскосмос" с агентством NASA по всем вопросам, кроме функционирования международной космической станции [7]. Выпуск высококачественной электроники, а именно электронно-компонентной базы (ЭКБ) для космической техники, характеризуется рисками зависимости от импорта. Бортовые ретрансляционные комплексы разрабатываемых спутников связи или импортируются, или производятся отечественными компаниями на основе импортных комплектующих. Каждый космический аппарат на 90 % состоит из ЭКБ, что повышает риски реализации стратегических проектов космической индустрии, усиливает зависимость России от иностранных поставок и ставит под угрозу национальную безопасность [8].

Санкции также ограничивают доступ к финансированию на мировом финансовом рынке крупнейших российских корпораций, которые чаще всего занимаются научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами, в

том числе двойного назначения. В целях сокращения валютной выручки в Россию также приняты меры по ограничению экспорта продукции машиностроения, ВВТ российского производства. Риски нехватки заемного капитала влекут за собой нарушение сроков успешного завершения НИОКР, невозможность достижения запланированных целей и задач, подрывают научно-инновационный потенциал высокотехнологичных производств.

Данные Росстата и таможенной статистики показывают, что доля России в мировом экспорте машинно-технических средств составляет менее 0,5 %. Она занимает в рейтинге стран место в четвертом десятке. При этом по экспорту продукции атомного машиностроения Россия лидирует в мире (38,0 % мирового экспорта в 2018 г.), железнодорожной техники — входит в число 15 крупнейших стран-экспортеров (2,2 % мирового экспорта в 2018 г.). За последнее десятилетие экспорт России машинно-технической продукции увеличивался со среднегодовыми темпами около 2,5 % и составил по итогам 2019 г. 27,7 млрд долл. США (-5,0 % по сравнению с 2018 г.). Доля машин, оборудования и транспортных средств в суммарном экспорте России возросла с 5,6 % в 2010 г. до 6,5 % в 2019 г. [9].

Поставки продукции атомного машиностроения представлены преимущественно экспортом топлива для АЭС — тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ). По итогам 2019 г. экспорт России ТВЭЛ составил 0,8 млрд долл. США (-19 % к 2018 г.). Основные страны-импортеры ТВЭЛ из России: Украина — 0,22 млрд долл. США в 2019 г. (-35 % г/г), Китай — 0,15 млрд долл. США (+18 % г/г), Чехия — 0,13 млрд долл. США (+13 % г/г) и Болгария — 0,12 млрд долл. США (+70 % г/г) [9].

Российский экспорт прочей продукции атомного машиностроения (части ядерных реакторов, специальное оборудование) в 2019 г. снизился на 42 % г/г до 0,09 млрд долл. США. Основным импортером является Индия — 0,08 млрд долл. США (+25 % г/г).

Российский экспорт машинно-технической продукции двойного назначения составил по итогам 2019 г. 4,2 млрд долл. США, сократившись на 34,4 % к 2018 г. Основными импортерами в 2019 г. стали страны Большого Ближнего Востока (Египет, Алжир и Саудовская Аравия).

Стратегические позиции экспорта продукции гражданского машиностроения в 2019 г.: турбореактивные двигатели и их комплектующие, которые преимущественно поставлялись в Китай и Индию (рост в 2019 г. составил 10,0 % по сравнению с 2018 г. до 2,4 млрд долл. США); по-

ставки в Турцию, Китай, Алжир, Египет радиолокационной и радионавигационной аппаратуры (рост в 3,6 раза к 2018 г. до 1,0 млрд долл. США); экспорт в Белоруссию, Казахстан и Чехию автотранспортных средств и их комплектующих (рост составил 9,6 % до 0,6 млрд долл. США в 2019 г.); экспорт легковых автомобилей преимущественно сборочных производств зарубежных компаний (рост 23,7 % в 2019 г. до 1,6 млрд долл. США) [9].

Следовательно, значимым риском антироссийских санкций для компаний является потеря доступа к рынкам закупок и сбыта продукции, а для страны в целом — снижение объемов внешней торговли и недополучение бюджетных доходов в виде налогов.

Наиболее конкурентоспособной является узкоспециализированная продукция гражданского машиностроения, в том числе выпускаемая компаниями отечественного ОПК: радиолокационные комплексы для управления движением самолетов в воздухе, вертолеты массой более 2 т серии Ми-8/17, беспроводные коммутационные устройства и маршрутизаторы, промышленные лазеры и технологические комплексы лазерной обработки. Ключевыми импортерами указанных высокотехнологичных изделий являются Китай, Индия, страны Ближнего Востока (Турция, Алжир, Египет) и СНГ (Казахстан, Белоруссия) [9].

Однако несмотря на рост объемов экспорта продукции российского машиностроения в 2010—2019 гг., перспективы его наращивания ограничиваются зависимостью от импортных комплектующих и от крупных контрактов (прежде всего в ОПК), чрезмерной монополизацией ряда отраслей и ключевых секторов, а также низкой географической диверсификацией экспорта изделий массового потребления, востребованных преимущественно на рынке СНГ.

Объем экспорта продукции малого судостроения вырос за 2019 г. до 4,6 млн долл. США (темп роста составил 9,8 %). Стратегические рынки сбыта — Казахстан и Белоруссия, на которые приходится более 90 % поставок изделий. Экспорт маломерных судов в 2019 г. возрос преимущественно за счет поставок в Казахстан (1270 единиц техники). Однако в структуре российского экспорта их удельный вес остается незначительным. По данным Росстата, в 2019 г. в России произведено почти 84 тыс. малых судов, а доля экспорта составила всего 1,6 %. Риски роста импортозависимости по-прежнему высоки [10].

Сократился импорт грузовых автомобилей, нефтегазодобывающего оборудования (компрессоров и насосов) из стран дальнего зарубежья.



Менее существенно сократился импорт грузовых вагонов и авиационной техники, что обусловлено лоббированием мировыми лидерами авиастроения своих интересов. На товары, которые им выгодно вывозить и ввозить, антироссийские санкции не вводятся. Выпуск и внешняя торговля данными товарными позициями более устойчивы к влиянию рисков.

Со стороны США и ЕС отсутствуют санкции на экспорт в Россию легковых автомобилей, гражданских самолетов, лекарственных препаратов, некоторых других товаров. Такой экспорт высокотехнологичных изделий с высокой долей добавленной стоимости усиливает риски зависимости России как импортера. Например, парк воздушных судов крупных авиакомпаний России характеризуется высокой импортозависимостью, так как в нем преобладают авиалайнеры зарубежного производства, нет российских машин серий "Ил" и "Ту". В составе авиаотряда ПАО "Аэрофлота" всего 41 авиалайнер SSJ-100 из 252 единиц авиатехники [7]. Использование импортных изделий требует импорта соответствующих комплектующих, оборудования и программного обеспечения, обучения за границей работающего с импортной техникой персонала.

Анализируя изложенное, можно утверждать, что Россия адаптировалась к санкциям лишь частично. Российский финансовый рынок и промышленность зависимы в большей мере от цен на энергоносители, нежели от санкций. В частности, санкции были введены в 2014 г., но российская экономика существенно ухудшилась лишь спустя год после падения цен на нефть. Эксперты также обосновали количественную оценку прямого убытка от санкций в размере 1—1,5%-го пункта ВВП в год [11]. Развитие экономики России в 2019 г. зависело от воздействия деструктивных внешних факторов и глобальных трендов. Темпы роста национальной экономики сократились с 2,5 % в 2018 г. до 1,3 % в 2019 г. Оценка влияния антироссийских санкций основывается на динамике внешнего корпоративного долга, который, по данным Банка России, сокращался с 2014 г., к 1 кварталу 2019 г. сократился до 468 млрд долл. США (29 % к ВВП), снизившись по сравнению с 2013 г. почти на 40 % [12]. Кроме того, по данным Банка России, прямые инвестиции начали сокращаться в 2014 г., упали в 2015 г., но в дальнейшем возобновили незначительный рост. Очевидно, что российская экономика постепенно приспосабливается к санкциям, но оценку их влияния сложно разграничить с другими деструктивными факторами. Негативный эффект от санкций преимущественно заключается в ограничении инвестиций в ОПК.

В 2014 г. в 640 изделиях российского производства применялись комплектующие, импортируемые из Украины, государств-членов ЕС и НАТО. Программа импортозамещения 2014 г. требовала заменить отечественными аналогами примерно 700 образцов комплектующих, ввозимых из Украины, до 2018 г. и 860 образцов из стран Запада до 2022 г. [11].

Основной стратегической причиной изменения сроков программы перевооружения стало прекращение импорта электронной компонентной базы (ЭКБ). Риски нарушения условий западных поставок радиационно стойких микросхем классов *space* и *military* были и до 2014 г., что требовало их обязательного импортозамещения еще до санкций. Нестабильное обеспечение данными комплектующими, в том числе, привело к сдвигу на 2—3 года запуска ряда проектов военного и двойного назначения. Усиление конкуренции и последние неудачные запуски ракет-носителей в 2015—2018 гг. способствовали потере Россией мирового лидерства по количеству космических запусков. Прогнозируется, что к 2022 г. отечественные предприятия будут выпускать большую часть необходимой ЭКБ для космической индустрии, а отсутствие западных поставок будет компенсировано за счет производителей стран Азии.

Одной из основных проблем стала приостановка импорта из Украины и Германии двигательных установок для сборки вертолетов и судов. Вместо судовых дизелей производства MTU (Германия), входящих в состав судов пограничной охраны и корветов для ВМФ, стали использовать китайские и отечественные. Однако диверсифицировать риски полностью не удалось, поскольку после прекращения украинских поставок газотурбинных двигательных установок (ГТУ) для фрегатов (мощных надводных судов, эксплуатируемых ВМФ) вторая тройка фрегатов проекта 11356 поставлена в Индию. Выпуск следующих за головным кораблем "Адмирал Горшков" фрегатов проекта 22350 планомерно сдвигается вправо. Однако импортозамещение реализуется и здесь, поскольку в октябре 2016 г. на НПО "Сатурн" в Рыбинске был запущен комплекс по производству ГТУ [11, 13].

Риски усиления зависимости от импорта сокращаются за счет наращивания отечественного выпуска двигателей типа ТВ3-117/ВК-2500 для российских военных вертолетов. В 2019 г. двигателестроительная компания АО "ОДК-Климов" выпустила более 230 двигателей ВК-2500/ТВ3-117, а выпуск двигателей ТВ7-117 увеличен в 3 раза [14]. Это позволит впервые оснастить все передаваемые ВВС России военные вертолеты отече-

ственными разработками. В данной сфере прекращение поставок Украиной комплектующих на темпы перевооружения России не повлияло. Россия располагала запасами двигателей, а сотрудничество с украинской компанией "Мотор Сич", выпускающей данные моторы, продолжалось.

Подводя итог, отметим, что в целом санкции и ответная российская программа импортозамещения для ОПК повысили потребность в дополнительном финансировании и при этом способствовали задержкам поставок отдельных образцов ВВТ на годы. При этом санкции кардинально не изменили производственную программу вооружения для стратегических ядерных сил — основы национальной военной безопасности. Напротив, они создали новые возможности для ускоренного технико-технологического развития ОПК. Например, еще в 2005 г. Правительство закрепило необходимость переноса выпуска вертолетных двигателей и ГТУ для судов, однако фактически реализация задач началась после введения санкций.

Позитивным результатом антироссийских санкций для ОПК стала диверсификация заказчиков на мировом рынке. Так, согласно данным Минобороны РФ об экспорте вооружений в 2019 г., его объем превысил 15,2 млрд долл. США. Россия сохранила лидирующие позиции на мировом рынке вооружений.

В условиях санкций ОПК усовершенствует свою экспортную политику, поставляя некоторые новейшие образцы, улучшая сервисное обслуживание, расширяя присутствие на мировом рынке. Высоким спросом пользуются российские системы для ведения воздушного боя (54 % в структуре экспорта в 2019 г.) и противовоздушной обороны (30 %). Многие страны проявляют интерес к истребителям Су-35С и зенитным комплексам С-400. В ближайшем будущем на рынок будут интенсивно продвигаться системы ПВО С-350 и С-500 [13].

Ключевыми импортерами ВВТ российского производства стали страны Ближнего Востока. При этом С-400 приобрели также Индия и Турция. Россия воспользовалась намерением Индии провести масштабную модернизацию ВВС, ВМС и сухопутных войск, подписав контракт на 14 млрд долл. США на поставку 18 истребителей Су-30МКИ, 20 МиГ-29 новейшей модификации, 450 танков Т-90, 600 тыс. автоматов Калашникова и четырех фрегатов. В конце 2019 г. Россия получила аванс, что ускорит поставки техники. Россия наладила сотрудничество с Турцией, являющейся членом НАТО, несмотря на значи-

тельное противодействие альянса. Это стало существенной дипломатической победой.

Адаптация российской экономики к новым санкциям, их ужесточению, распространению на другие комплексы и сектора будет ощутимой, но не критичной. Развитие энергетики зависит больше от цен на сырье, чем от доступа к рынкам. Масштаб влияния будет определяться сферой применения новых санкций. Нет информации о том, как конкретно будут эти санкции применяться, однако опасения инвесторов влияют на приток капитала. Эффект от санкций в России будет также зависеть от позиции ключевых торговых партнеров — ЕС и Китая. Ряд стран ЕС, потерпевших значительные убытки вследствие прекращения торговли с Россией, не приветствует односторонние меры со стороны США. Наращивание темпов роста российской экономики требует инвестиций для масштабного обновления основных производственных фондов, внедрения инновационных технологий. При ужесточении санкций против России это усложняется, поэтому стагнация или экономический рост в пределах 2 % является вероятным сценарием. Россия под санкциями теряет стабильно 1—2 % ВВП в год, что не дает экономике развиваться [11].

В ближайшем будущем отмена санкций невозможна, однако их влияние на российскую экономику преувеличено. Последствия являются долгосрочными и накопительными. Масштабы импортозамещения от текущих санкций несопоставимо малы с импортозамещением после кризиса 1998 г. Гораздо более критична изоляция России от мировой экономики, в первую очередь развитых стран. Результатом будет потеря конкурентоспособности в долгосрочной перспективе и снижение самого потенциала роста экономики. Появляется отложенный прямой и косвенный негативный эффект, более существенный, нежели рост оттока капитала и снижение экспорта.

Машиностроительные предприятия России создают конкурентоспособные изделия только для специфичных и уникальных сегментов рынка. Лишь малое количество компаний способно выдержать конкуренцию на глобальном рынке, и это в основном оборонные предприятия. Это доказывает стратегическую приоритетность масштабной реиндустриализации, сфокусированной на ОПК.

Для формирования стабильной и мощной производственно-технологической базы ОПК и комплексного решения накопившихся проблем приняты стратегические документы, в частности

Стратегия национальной безопасности РФ до 2020 г. [15], Военная доктрина РФ, ФЦП "Развитие ОПК Российской Федерации на 2011—2020 годы", Государственная программа вооружения на 2011—2020 гг., Стратегия инновационного развития РФ на период до 2020 г.

Федеральный закон от 31 декабря 2014 г. № 488-ФЗ "О промышленной политике в Российской Федерации" содержит комплекс мер по укреплению и развитию инновационного потенциала высокотехнологичных компаний, повышению их конкурентоспособности и снижению рисков на всех этапах производственного цикла. Разработаны механизмы и инструменты государственной поддержки инновационно-активных предприятий, инвестирующих в проекты по импортозамещению и выпуску уникальных изделий с высокой добавленной стоимостью, не имеющих аналогов в стране. Успешно применяются программы финансирования и инвестиционные контракты, налоговые преференции, субсидии и другие инструменты.

В условиях санкций, геополитической нестабильности и ужесточения глобальной конкуренции необходимо разрабатывать мероприятия по оценке и управлению рисками высокотехнологичных производств ОПК, формирующих ядро национальной безопасности. Создание необходимых условий для инновационного развития потребует государственных гарантий через контрактную систему, налоговых льгот и механизмов кредитно-валютного регулирования, инновационных технологий, инвестиций в развитие инженерно-технических кадров в ОПК.

Реализация инновационного, научно-технического и технологического потенциала, а также развитие наукоемких высокотехнологичных производств в отечественном ОПК возможны при активной государственной финансовой поддержке. Проектирование конкурентоспособных наукоемких и инновационных изделий и образцов ВВТ, востребованных в России, на мировых рынках, инициация стратегических проектов повысят инвестиционную активность оборонных предприятий, их инновационное развитие. ВВС России получат обновленный парк современных образцов ВВТ.

Обеспечение национальной военной безопасности и обороноспособности, как и активизация инновационных процессов, невозможно без масштабной модернизации производственного потенциала ОПК. Проектирование уникальных инновационных изделий требует применения новейших технологий, формирования мощного стратегического задела в НИОКР. Основным барьером для повышения национальной без-

опасности и конкурентоспособности России остается экспортно-сырьевая модель развития экономики, зависимость от внешних факторов.

Стратегические приоритеты государственной поддержки должны быть направлены на высокотехнологичные сектора, выпускающие изделия с высокой добавленной стоимостью и создающие рабочие места для высококвалифицированных инженерно-технических кадров. Программы государственной поддержки должны фокусироваться на продвижении и сбыте данных изделий на мировых рынках. Управление рисками ОПК и космической промышленности в условиях усиления внешних угроз требует наращивания инновационного потенциала и инновационной активности оборонных предприятий. Развитие ОПК требует смещения акцентов промышленной политики, комплексного решения стратегических проблем, активного взаимодействия заинтересованных сторон. Достижение обозначенных задач возможно при ликвидации внешнеторговых барьеров, повышении уровня открытости экономики, создании механизмов стимулирования экспорта.

### Заключение

Подводя итог, отметим, что введение против России санкций на фоне неблагоприятной геополитической ситуации и конъюнктуры глобальных рынков, неправомерного применения инструментов недобросовестной конкуренции, правовых механизмов, мер политической, экономической и научно-технологической изоляции России повлекло за собой ряд негативных последствий. Усугубили ситуацию с замедлением темпов экономического роста такие присущие России особенности, как экспортно-сырьевая модель экономики, финансовая и технологическая зависимость ряда отечественных компаний от импорта. Вследствие этого финансовое состояние и конкурентные позиции крупнейших отечественных компаний на глобальных рынках значительно ухудшились. Последствием стало сокращение иностранных инвестиций в экономику России, ухудшение экономического и геополитического положения страны.

Антироссийские санкции усугубили экономическое положение ОПК. Однако оборонные предприятия адаптировались к отрицательному влиянию внешних негативных факторов, смогли нарастить конкурентные преимущества и диверсифицировать портфель внешних заказчиков. Учитывая созданные недружественными Россией государствами ограничения и препятствия на

пути развития внешнеэкономического сотрудничества, российские компании смогли переориентировать свой экспорт и импорт на дружественные страны, а также создать базу для развития приоритетных секторов национальной экономики.

Устойчивый рост экономики России требует приоритетной системной поддержки высокотехнологического комплекса, включая ОПК, без инновационного развития которых невозможно обеспечение национальной безопасности. В условиях санкций мощный технико-техно-

логический прорыв должен стать стратегической целью реализуемой Правительством политики. Наращивание конкурентных позиций России на мировых рынках, ликвидация импортозависимости требуют реформирования промышленной политики, внедрения эффективных методов и инструментов управления рисками оборонных предприятий, отказа от преобладающей сырьевой модели экономики и концентрации на приоритетном развитии высокотехнологичных, наукоемких производств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Плотников В. А.** Глобальная нестабильность: попытка теоретического анализа // Государство и рынок: механизмы взаимодействия в условиях глобальной нестабильности экономических систем. — СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2014. С. 195—205.
2. **Dutta S., Lanvin B., Wunsch-Vincent S.** The Global Innovation Index 2020 [Электронный ресурс]. URL: [https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo\\_pub\\_gii\\_2020.pdf](https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_gii_2020.pdf)
3. **Ерасова Е. А., Плотников В. А.** Оборонно-промышленный комплекс России и перспективы его развития в условиях экономических санкций и реализации политики импортозамещения // Экономическое возрождение России. 2015. № 2(44). С. 102—110.
4. Мировые расходы на оборону в 2011—2018 гг. Гл. 1. Сайт ЦАМТО [Электронный ресурс]. URL: <https://armstrade.org/pages/main/magazines/yearly/report/1/index.shtml>
5. Все санкции США и Евросоюза в отношении России с 2014 года [Электронный ресурс]. URL: <https://www.currenttime.tv/a/russia-american-european-sanctions/29449693.html>
6. США ввели санкции против трех оборонных предприятий России // Ведомости. 2020 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vedomosti.ru/politics/news/2020/02/13/822997-ssha-rossii>
7. **Казанцев С. В.** Оценка влияния антироссийских санкций на топливно-энергетический и оборонно-промышленный комплексы России // Мир новой экономики. 2018. № 12(3). С. 46—57. DOI: 10.26794/2220-6469-2018-12-3-46-57.
8. **Рогозин Д.** Русский космос // Российская газета. Федеральный выпуск. 2014. № 83. С. 17.
9. Итоги внешнеэкономической деятельности Российской Федерации в 2019 году. Министерство экономического развития Российской Федерации. 2020 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/66eec1250c653fc9abd0419604f44bbd/VED.pdf>
10. По северным морям. Россия возобновит экспорт малых судов в Швецию // Российская газета. 2020. Федеральный выпуск № 51(8105). <https://rg.ru/2020/03/10/rossiia-vozobnovit-eksport-malyh-sudov-v-shveciiu.html>
11. **Виноградова Е., Бурлакова Е., Никольский А.** Почему санкции против России внешне неэффективны // Ведомости. 2017 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vedomosti.ru/economics/articles/2017/08/14/729205-sanktsii-neeffectivni>
12. **Китаев И.** Внешний долг России [Электронный ресурс]. URL: <https://smart-lab.ru/blog/634276.php>
13. **Валагин А.** Обратный эффект: оружейные санкции США помогли России [Электронный ресурс]. URL: <https://rg.ru/2020/04/06/obratnyj-effekt-sankcii-ssha-pomogli-rossii.html>
14. "ОДК-Климов" изготовил в 2019 году более 230 вертолетных двигателей ВК-2500/ТВ3-117 [Электронный ресурс]. URL: [https://bmpd.livejournal.com/3992553.html#:~:text=Выпущено%20более%20230%20двигателей%20ВК,количество%20изготовленных%20двигателей%20ТВ3-117.&text=Выручка%20АО%20"ОДК-Климов",больше%20аналогичного%20показателя%20прошлого%20года](https://bmpd.livejournal.com/3992553.html#:~:text=Выпущено%20более%20230%20двигателей%20ВК,количество%20изготовленных%20двигателей%20ТВ3-117.&text=Выручка%20АО%20)
15. Указ Президента РФ от 12.05.2009 № 537 "О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года" (с изменениями и дополнениями от 1.07.2014).

## **ANTI-RUSSIAN SANCTIONS: RISKS AND NEW OPPORTUNITIES FOR HIGH-TECH INDUSTRIES**

*A. A. Kryukov, D. S. Jepa*

JSC "Almaz-Antey" Air and Space Defence Corporation", Moscow, Russia

*The article presents the strategic goals of anti-Russian sanctions in the high-tech complex, and the risks of its further sustainable development. The analysis of exports and imports of machine-building products and the military-industrial complex in the context of sanctions is carried out. The assessment of measures to suspend and terminate military cooperation with Russia is given. The main results of the import substitution programs in Russia in response to the sanctions measures are considered. The main achievements and positive results of the anti-Russian sanctions in the military-industrial complex are presented, in particular, the diversification of customers in the world market, increasing the competitiveness of domestic products. Strategic directions for restoring the production, scientific, technical and technological potential and innovative development of high-tech industries of the Russian military-industrial complex are proposed.*

*Keywords:* sanctions, risks and opportunities, high-tech complex, military-industrial complex.

*Bibliography* — 15 references.

*Received April 8, 2021*

## **К ВОПРОСУ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЙСКОВОГО РЕМОНТА НОВЫХ ОБРАЗЦОВ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ В СТРОЕВЫХ ЧАСТЯХ**

<sup>1</sup>А. А. Плиплин, канд. техн. наук; <sup>2</sup>А. В. Родионов, канд. техн. наук; <sup>1</sup>Д. О. Лобов

<sup>1</sup> Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*Рассмотрены вопросы войскового ремонта перспективных и новых образцов вооружения и военной техники в строевых частях на базе технико-эксплуатационной части. Определены наименее надежные элементы электронных блоков и систем. Предложен подход по ремонту электронных блоков в строевых частях.*

*Ключевые слова:* войсковой ремонт, неисправность агрегатов.

Боевая готовность образцов вооружения и военной техники определяется исправностью и временем, необходимым на ее подготовку к выполнению боевых задач.

Все больше внимания уделяется вопросам войскового ремонта перспективных и новых образцов вооружения и военной техники (ВВТ) в строевых частях на базе технико-эксплуатационной части. Данная концепция не является новаторской. Так, в 90-гг. XX в. в целях экономии денежных средств осуществлялся войсковой ремонт отдельных спецсистем самолета МиГ-29, а на основании регламента технической эксплуатации было разработано руководство по ремонту блоков и агрегатов самолета МиГ-29 [1].

Необходимо отметить, что при сложившихся экономических отношениях между Министерством Обороны Российской Федерации и предприятиями военно-промышленного комплекса предприятия крайне не желают упускать экономически выгодные контракты по обеспечению войскового ремонта новейших образцов ВВТ. Так, в эксплуатационной документации технического обслуживания системы управления

оружием самолетов Су-30СМ и Су-35 однозначно отмечено, что глубина поиска неисправностей ограничивается нахождением неисправного блока или пульта. При определении неисправного (отказавшего) блока или пульта он демонтируется с летательного аппарата и заменяется на исправный. Ремонт отказавшего блока или агрегата осуществляется на авиаремонтном заводе либо на заводе-изготовителе [2, 3].

Однако при данном подходе приходится направлять все неисправные блоки и агрегаты образцов ВВТ на предприятия промышленности даже с незначительными повреждениями, что негативно сказывается на времени их восстановления. Также стоит отметить, что заводы-изготовители пытаются увеличить количество отказавших блоков и агрегатов путем размещения предохранителей модульных плат внутри корпуса блока.

В работе [4] отмечено, что Министерство Обороны Российской Федерации неспособно осуществить все виды ремонта современных образцов ВВТ. Последнее связано с тем, что для этого потребуются не только значительные государственные капитальные вложения в технологическое перевооружение помещений для организации ремонта, но и привлечение дополнительного гражданского персонала за счет молодых специалистов, способных осуществлять войсковой ремонт, а также их подготовка и решение других проблемных вопросов. Сложность осуществления войскового ремонта в строевых частях обусловлена рядом факторов:

- в войска поступают сложные образцы ВВТ, которые требуется поддерживать в техни-

---

**Плиплин Андрей Александрович**, доцент.

E-mail: samolet31@rambler.ru

**Родионов Алексей Васильевич**, доцент, профессор кафедры.

E-mail: samolet31@rambler.ru

**Лобов Дмитрий Олегович**, курсант.

E-mail: samolet31@rambler.ru

---

*Статья поступила в редакцию 17 мая 2021 г.*

© Плиплин А. А., Родионов А. В., Лобов Д. О., 2021

ческой готовности на протяжении всей эксплуатации;

- трудоемкий ремонт способны выполнять только организации-изготовители;
- для правильной и безаварийной эксплуатации образцов ВВТ требуется воссоздать центры подготовки специалистов Вооруженных Сил на базе предприятий-производителей образцов ВВТ.

Анализ неисправностей агрегатов, блоков и систем новых образцов ВВТ показал, что наименее надежными являются элементы электронных плат: конденсаторы, резисторы, микросхемы, микросборки, межплатные соединители, датчики. Ремонт их, как правило, требует специальной контрольно-проверочной аппаратуры, навыков ручного поиска отказавшего элемента, автоматизированных паяльных станций. Однако в условиях части поэлементное восстановление электронных плат невозможно и их ремонт можно реализовать лишь модульной заменой. Реже отказывают реле, трансформаторы и другие элементы, монтируемые навесным монтажом. Устранение таких отказов в эксплуатации возможно и может проводиться методом замены сборочной единицы. Повреждения корпуса, крепежа, штепсельных разъемов, электропроводки и металлизации, трубопроводов в ремонте проблем не вызывают.

Таким образом, необходимо найти компромисс по осуществлению войскового ремонта блоков и агрегатов ВВТ: что возможно восстановить в условиях технико-эксплуатационной части, восстанавливается силами личного состава инженерно-авиационной службы (при условии наличия эксплуатационной документации с функциональными схемами и имеющими спецификацию поэлементно); в противном случае блоки и агрегаты отправляют на заводы промышленности.

Осуществление организации войскового ремонта потребует создания специализированных рабочих мест, групп по войсковому ремонту, а также обучения войсковому ремонту инженерно-технического состава на заводах промышленности. При этом необходимо поменять концепцию проверки блоков и агрегатов с помощью контрольно-проверочной аппаратуры: выявление отказавшего блока (агрегата) должно осуществляться не до блока, а до конкретной модульной платы изделия, что ведет за собой увеличение глубины контроля, т. е. необходимо модернизировать программно-методическое обеспечение контрольно-проверочной аппаратуры.

При поступлении блока (агрегата) в ремонт необходимо осуществить следующие мероприя-

тия: очистить блок (агрегат) от пыли и грязи, продуть его чистым сжатым воздухом; осмотреть блок (агрегат) на наличие внешних повреждений; осмотреть блок (агрегат) на целостность лакокрасочного покрытия; осмотреть внешний разъем блока (агрегата) на наличие коррозии и повреждений.

Далее осуществляется дефектация отказавшего блока (агрегата), которая включает:

- осмотр плат с печатным монтажом (модули монтажные). Проверку целостности плат и печатных проводников;
- осмотр целостности радиоэлементов, установленных на печатных элементах (по изменению окраски, обугливанию, вздутию);
- осмотр реле, установленных на платах, на отсутствие механических повреждений. Проверку работоспособности реле прозвонкой;
- осмотр проводов монтажного жгута на отсутствие разрушения, оплавления или изменения цвета изоляции проводов;
- осмотр наконечников на отсутствие механических повреждений;
- осмотр штепсельных разъемов в целях обнаружения забоин и вмятин на резьбовых частях, поломанных и погнутых контактов;
- проверку резьбовых частей деталей на отсутствие забоин, вмятин, нарушения резьбы;
- осмотр перемычек металлизации;
- осмотр крепежных деталей (винтов, гаек, шайб, колонок). Детали с повреждением шлицов и граней под ключ, изломами, срывом резьбы, забоинами более чем на 50 % числа витков ремонту не подлежат;
- проверку всех узлов и деталей на отсутствие механических повреждений.

При проведении войскового ремонта блока (агрегата) с заменой радиоэлементов или монтажных печатных плат, восстановлением разъемов или проводников внутри блочного монтажа эти блоки и агрегаты подлежат проверке на КПА.

Проверка работоспособности блоков (агрегатов) проводится с помощью штатной аппаратуры контроля в соответствии с инструкциями (технологическими картами), входящими в комплект контрольно-проверочной аппаратуры, а также другой аппаратуры проверки параметров (осциллографов, вольтметров и т. д.), обеспечивающей требуемую точность измерения выходных параметров.

В ходе ознакомления с технологиями восстановления неисправностей агрегатов, блоков и систем авиационного вооружения на авиаремонтных заводах было сделано заключение о том, что реализацию войскового ремонта в ча-



стях следует возобновлять с развития устойчивых навыков поиска неисправностей, навыков сборки-разборки, пайки элементов, отбортовки жгутов, замены штепсельных разъемов и т. п.

Отдельное направление, требующее внимательного рассмотрения, — это функционально-программное обеспечение (ФПО) КПА, поскольку в войсках отсутствует определённый стройный подход в обеспечении отдельных систем авиационного вооружения различными типами и модификациями КПА с определенными версиями ФПО. Ошибки, первоначально заложенные при проектировании как систем контроля, так и системы управления оружием, приводят к тому, что старшая версия ФПО компонентов, как правило, не совместима "вниз". При наличии инженера-программиста рабочего места на базе персонального компьютера с библиотекой ФПО и необходимой коммутационной периферией системы смогли бы прошиваться

под нужную версию. Сейчас для решения данной проблемы требуется выезд бригады промышленности (для войск такое рабочее место не разрабатывалось). Состав рабочего места должен включать обычный персональный компьютер с ПМО, коммутатор, жгуты и переходные адаптеры под штепсельные разъемы.

### Вывод

Таким образом, осуществление войскового ремонта образцов нового и перспективного ВВТ позволит сократить время нахождения отдельных блоков и агрегатов в ремонте, уменьшить затраты на финансирование мероприятий по восстановлению этих образцов ВВТ, более эффективно использовать научно-производственный потенциал инженерно-технического состава авиационных частей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Выпуск № 6768. Руководство по войсковому ремонту самолета МиГ-29. Кн. 2. Авиационное вооружение. Ч. 1.
2. Регламент по технической эксплуатации самолета Су-30СМ. Т. 3. Авиационное вооружение.
3. Регламент по технической эксплуатации самолета Су-35. Т. 3. Авиационное вооружение.
4. **Фаличев О. А.** Ремонт займётся профессионалы // Военно-промышленный курьер. 2014. № 26(544).

## ON THE ORGANIZATION OF MILITARY REPAIRS OF NEW TYPES OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT IN COMBAT UNITS

<sup>1</sup>A. A. Pliplin, <sup>2</sup>A. V. Rodionov, <sup>1</sup>D. O. Lobov

<sup>1</sup> Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education Military Educational Research Centre of Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin", Voronezh, Russia

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*The article deals with the issues of military repair of perspective and new models of weapons and military machinery at special technical bases located in combat units. Reliable elements of electronic components and systems are determined. Also are proposed ways of repair of electronic components in combat units.*

**Keywords:** military repair, fault of aggregates.

**Bibliography** — 4 references.

*Received May 17, 2021*

Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России: Межотр. науч.-техн. журнал / Федеральное государственное унитарное предприятие «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2021. Вып. 3. С. 1—68.

Редактор *О. А. Константинова*

Компьютерная верстка: *Н. В. Ильина, К. В. Трыкина*

Подписано в печать 24.08.2021.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 7,9. Уч.-изд. л. 8,2.

Тираж 250 экз. Заказ 1979.

Свободная цена.

Адрес редакции: 125424, Москва,

Волоколамское ш., 77.

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».

<http://ntckompas.ru>

Отпечатано: 101000, Москва,

Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, офис 105.

ИП Кириченко Алексей Викторович.

Индекс 79379.

**БЛАНК-ЗАКАЗ НА ПОДПИСКУ 2021 г.  
на издания ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»**

Наименование издания	Периодичность в год	Цена 1 экз., руб.	Кол-во выпусков в год	Общая сумма, руб.
Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России	4	1550,00		
Конструкции из композиционных материалов	4	1700,00		
Экология промышленного производства	4	1500,00		
Информационные технологии в проектировании и производстве	4	1750,00		
Вопросы защиты информации	4	1750,00		
<i>В цену включены: НДС — 10 % и стоимость почтовой доставки.</i>				

*Поставка журналов подписчикам через издательство осуществляется почтовыми бандеролями с приложением всех необходимых бухгалтерских документов.*

**Наши реквизиты:**

Полное наименование организации: \_\_\_\_\_

Сокращенное наименование организации: \_\_\_\_\_

ИНН/КПП \_\_\_\_\_

ОКПО \_\_\_\_\_

Расчётный счёт № \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_

к/с \_\_\_\_\_ БИК \_\_\_\_\_

Юридический адрес: \_\_\_\_\_

Почтовый адрес: \_\_\_\_\_

Контактное лицо \_\_\_\_\_ тел. \_\_\_\_\_

E-mail: \_\_\_\_\_

*(Для оформления счёта и бухгалтерских документов просьба заполнить все строчки).*

**Справочно:**

Заполненный бланк-заказ просьба отправить по факсу: 8(495) 491-44-80 или

E-mail: secretariat@ntckompas.ru

Более подробную информацию об изданиях и подписке можно получить по телефону:

8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-20.

E-mail: ivleva@ntckompas.ru

Адрес редакции: 125424, Москва, Волоколамское шоссе, д.77.

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».