

ISSN 2221-5182

Импакт-фактор РИНЦ: 0,485

# «НАУКА И БИЗНЕС: ПУТИ РАЗВИТИЯ»

научно-практический журнал

№ 1(175) 2026

*Главный редактор*

**Тарандо Е.Е.**

*Редакционная коллегия:*

**Воронкова Ольга Васильевна**  
**Атабекова Анастасия Анатольевна**  
**Омар Ларук**  
**Левшина Виолетта Витальевна**  
**Малинина Татьяна Борисовна**  
**Беднаржевский Сергей Станиславович**  
**Надточий Игорь Олегович**  
**Снежко Вера Леонидовна**  
**У Сунцзе**  
**Ду Кунь**  
**Тарандо Елена Евгеньевна**  
**Пухаренко Юрий Владимирович**  
**Курочкина Анна Александровна**  
**Гузикова Людмила Александровна**  
**Даукаев Арун Абалханович**  
**Тютюнник Вячеслав Михайлович**  
**Дривотин Олег Игоревич**  
**Запивалов Николай Петрович**  
**Пеньков Виктор Борисович**  
**Джаманбалин Кадыргали Коныспаевич**  
**Даниловский Алексей Глебович**  
**Иванченко Александр Андреевич**  
**Шадрин Александр Борисович**

**В ЭТОМ НОМЕРЕ:**

**МАШИНОСТРОЕНИЕ:**

- Машины, агрегаты и технологические процессы
- Роботы, мехатроника и робототехнические системы

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ:**

- Математическое моделирование и численные методы
- Инженерная геометрия и компьютерная графика. Цифровая поддержка жизненного цикла изделий

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ:**

- Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства

- Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

**ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ:**

- Математические, статистические и инструментальные методы в экономике
- Региональная и отраслевая экономика
- Менеджмент

Москва 2026

# «НАУКА И БИЗНЕС: ПУТИ РАЗВИТИЯ»

научно-практический журнал

Журнал

«Наука и бизнес: пути развития»  
выходит 12 раз в год.

Журнал зарегистрирован  
Федеральной службой по надзору  
за соблюдением законодательства  
в сфере массовых коммуникаций и  
охране культурного наследия  
(Свидетельство ПИ № ФС77-44212).

Учредитель

МОО «Фонд развития науки и  
культуры»

Журнал «Наука и бизнес: пути  
развития» входит в перечень ВАК  
ведущих рецензируемых научных  
журналов и изданий, в которых  
должны быть опубликованы  
основные научные результаты  
диссертации на соискание ученой  
степени доктора и кандидата наук.

Главный редактор

**Е.Е. Тарандо**

Выпускающий редактор

**В.С. Солодова**

Редактор иностранного  
перевода

**Н.А. Гунина**

Инженер по компьютерному  
макетированию

**В.С. Солодова**

**Адрес редакции:**

г. Москва, ул. Малая Переяславская,  
д. 10, к. 26

**Телефон:**

89156788844

**E-mail:**

nauka-bisnes@mail.ru

На сайте

**<http://globaljournals.ru>**

размещена полнотекстовая  
версия журнала.

Информация об опубликованных  
статьях регулярно предоставляется  
в систему Российского индекса  
научного цитирования  
(договор № 2011/30-02).

Перепечатка статей возможна только  
с разрешения редакции.

Мнение редакции не всегда  
совпадает с мнением авторов.

## Экспертный совет журнала

**Тарандо Елена Евгеньевна** – д.э.н., профессор кафедры экономической социологии Санкт-Петербургского государственного университета; тел.: 8(812)274-97-06; E-mail: elena.tarando@mail.ru.

**Воронкова Ольга Васильевна** – д.э.н., профессор, председатель редколлегии, академик РАН, г. Санкт-Петербург; тел.: 8(981)972-09-93; E-mail: nauka-bisnes@mail.ru

**Атабекова Анастасия Анатольевна** – д.ф.н., профессор, заведующая кафедрой иностранных языков юридического факультета Российского университета дружбы народов; тел.: 8(495)434-27-12; E-mail: aaatabekova@gmail.com.

**Омар Ларук** – д.ф.н., доцент Национальной школы информатики и библиотек Университета Лиона; тел.: 8(912)789-00-32; E-mail: omar.larouk@enssib.fr.

**Левшина Виолетта Витальевна** – д.т.н., профессор кафедры управления качеством и математических методов экономики Сибирского государственного технологического университета; 8(3912)68-00-23; E-mail: violetta@sibstu.krasnoyarsk.ru.

**Малинина Татьяна Борисовна** – д.социол.н., профессор кафедры социального анализа и математических методов в социологии Санкт-Петербургского государственного университета; тел.: 8(921)937-58-91; E-mail: tatiana\_malinina@mail.ru.

**Беднаржевский Сергей Станиславович** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности Сургутского государственного университета, лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники, академик РАН и Международной энергетической академии; тел.: 8(3462)762-812; E-mail: sbed@mail.ru.

**Надточий Игорь Олегович** – д.ф.н., профессор, заведующий кафедрой философии Воронежской государственной лесотехнической академии; тел.: 8(4732)53-70-708, 8(4732)35-22-63; E-mail: inad@yandex.ru.

**Снежко Вера Леонидовна** – д.т.н., профессор, заведующая кафедрой систем автоматизированного проектирования и инженерных расчетов Российского государственного аграрного университета – Московкой сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева; тел.: 8(495)153-97-66, 8(495)153-97-57; E-mail: VL\_Snejko@mail.ru.

**У Сунцзе (Wu Songjie)** – к.э.н., преподаватель Шаньдунского педагогического университета (г. Шаньдун, Китай); тел.: +86(130)21-69-61-01; E-mail: qdwcung@hotmail.com.

**Ду Кунь (Du Kun)** – к.э.н., доцент кафедры управления и развития сельского хозяйства Института кооперации Циндаоского аграрного университета (г. Циндао, Китай); тел.: 89606671587; E-mail: tambovdu@hotmail.com.

# «НАУКА И БИЗНЕС: ПУТИ РАЗВИТИЯ»

## научно-практический журнал

**Пухаренко Юрий Владимирович** – д.т.н., член-корреспондент РААСН, профессор, заведующий кафедрой технологии строительных материалов и метрологии Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета; тел.: 89213245908; E-mail: tsik@spbgasu.ru.

**Курочкина Анна Александровна** – д.э.н., профессор, член-корреспондент Международной академии наук Высшей школы, заведующая кафедрой экономики предприятия природопользования и учетных систем Российского государственного гидрометеорологического университета; тел.: 89219500847; E-mail: kurochkinaanna@yandex.ru.

**Морозова Марина Александровна** – д.э.н., профессор, директор Центра цифровой экономики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург; тел.: 89119555225; E-mail: marina@russiatourism.pro.

**Гузикова Людмила Александровна** – д.э.н., профессор Высшей школы государственного и финансового управления Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург; тел.: 8(911)814-24-77; E-mail: guzikova@mail.ru.

**Даукаев Арун Абалханович** – д.г.-м.н., заведующий лабораторией геологии и минерального сырья Комплексного научно-исследовательского института имени Х.И. Ибрагимова РАН, профессор кафедры физической географии и ландшафтоведения Чеченского государственного университета, г. Грозный (Чеченская Республика); тел.: 89287828940; E-mail: daykaev@mail.ru.

**Тютюнник Вячеслав Михайлович** – к.х.н., д.т.н., профессор, директор Тамбовского филиала Московского государственного университета культуры и искусств, президент Международного Информационного Нобелевского Центра, академик РАЕН; тел.: 8(4752)50-46-00; E-mail: vmt@imb.ru.

**Дривотин Олег Игоревич** – д.ф.-м.н., профессор кафедры теории систем управления электрофизической аппаратурой Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург; тел.: (812)428-47-29; E-mail: drivotin@yandex.ru.

**Запывалов Николай Петрович** – д.г.-м.н., профессор, академик РАЕН, заслуженный геолог СССР, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск; тел.: +7(383)333-28-95; E-mail: ZapivalovNP@ipgg.sbras.ru.

**Пеньков Виктор Борисович** – д.ф.-м.н., профессор кафедры математических методов в экономике Липецкого государственного педагогического университета, г. Липецк; тел.: 89202403619; E-mail: vbpenkov@mail.ru.

**Джаманбалин Кадыргали Коныспаевич** – д.ф.-м.н., профессор, ректор Костанайского социально-технического университета имени академика Зулкарнай Алдамжар, г. Костанай (Республика Казахстан); E-mail: pkkstu@mail.ru.

**Даниловский Алексей Глебович** – д.т.н., профессор кафедры судовых энергетических установок, систем и оборудования Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, г. Санкт-Петербург; тел.: (812)714-29-49; E-mail: agdanilovskij@mail.ru.

**Иванченко Александр Андреевич** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания и автоматики судовых энергетических установок Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург; тел.: (812)321-37-34; E-mail: IvanchenkoAA@gumrf.ru.

**Шадрин Александр Борисович** – д.т.н., профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания и автоматики судовых энергетических установок Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург; тел.: 321-37-34; E-mail: abshadrin@yandex.ru.

## Содержание

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

#### Математическое моделирование и численные методы

- Бозиев О.Л., Губашиев М.Б.** Аппроксимация решений уравнения Хопфа решениями ассоциированного нагруженного уравнения..... 8
- Бычкова Т.В., Безик Д.А.** Моделирование демпфирующих свойств двухслойных покрытий на цилиндрической подложке ..... 15
- Караченцев А.И., Воронов П.Л.** Математическое моделирование прочностных и ресурсных характеристик водородных силовых установок под авиационными нагрузками: численный подход и программная реализация ..... 20
- Фуркало И.В., Аншаков О.М.** Автоматическое определение авторства текста с помощью его звукового профиля..... 25
- Фуркало И.В., Аншаков О.М.** Построение алгоритма фонетической транскрипции текста..... 32

#### Инженерная геометрия и компьютерная графика. Цифровая поддержка жизненного цикла изделий

- Игнатова Е.И., Фролов И.С., Свойкин Ф.В.** Алгоритм моделирования шестиугольной усеченной пирамиды средствами КОМПАС-3D V23..... 39

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

#### Машины, агрегаты и технологические процессы

- Горшкова О.О., Брызгалова Е.А., Люшненко М.Э.** Возможности модернизации технологического процесса выделения возвратного изобутилена..... 48

#### Роботы, мехатроника и робототехнические системы

- Савельев Н.В., Воробьева Л.С., Савельев А.Н.** Технико-экономическое обоснование проектирования, выпуска и реализации обучающего промышленного робота..... 52
- Чернецов И.В., Потапов М.П.** Разработка и апробация прототипа роботизированного тренажерного комплекса с автоматизированным управлением параметрами шкалы ШОТИ..... 58

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства**

- Амирханян Л.Г., Ляпунцова Е.В.** Использование машинного обучения и нечеткой логики для построения гибридной системы детекции дефектов ..... 64
- Белая М.Н., Гаг А.А.** Анализ процессов формирования исполнительной документации в строительстве и перспективы применения инструментов бережливого строительства ..... 70
- Пестерев В.Г., Харахинов В.А.** Методология автоматизации ИТ-инфраструктуры предприятия на основе принципов DevOps: архитектурный анализ и адаптивная модель внедрения ..... 73
- Трофимова Ю.А., Перерва О.Л.** Цифровые двойники как инструмент совершенствования промышленных производств ..... 75

**Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды**

- Голубев Н.А., Лоскутов И.А., Скворцова Д.А.** Методы спектрального отображения данных сцинтилляционных детекторов и классификации состава локальных включений ..... 81

**ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Математические, статистические и инструментальные методы в экономике**

- Батюков М.В., Гречушкин В.А., Кравченко В.М., Поленикова Г.И.** Методология А3 как инструмент повышения эффективности реализации проектов ..... 85

**Региональная и отраслевая экономика**

- Жигжитова Б.Н., Аюшеева А.О., Григорьева А.И.** Развитие приграничного сотрудничества регионов Дальнего Востока на примере Приморского края ..... 90
- Кузязев А.Н., Рахматуллин Ю.Я., Гумеров Э.А., Меньшиков Е.И.** Механизмы реализации и тенденции развития государственно-частного партнерства и муниципально-частного партнерства ..... 94

**Менеджмент**

- Уткина Е.И., Батуева А.А.** Инструменты управления устойчивым развитием образовательного учреждения на принципах ESG ..... 99

УДК 51.77

О.Л. БОЗИЕВ, М.Б. ГУБАШИЕВ

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет  
имени Х.М. Бербекова», г. Нальчик

## АППРОКСИМАЦИЯ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЯ ХОПФА РЕШЕНИЯМИ АССОЦИИРОВАННОГО НАГРУЖЕННОГО УРАВНЕНИЯ

*Ключевые слова:* нелинейное дифференциальное уравнение; последовательности функции; приближения; редукция; уравнение Хопфа.

*Аннотация.* Цель исследования – изучение методов редукции нелинейных дифференциальных уравнений к нагруженным уравнениям и интегральным формам для построения приближенных решений на примере квазилинейного уравнения Хопфа.

Задачи исследования: рассмотреть прямую и повторную редукцию уравнения с заменой искомой функции, исследовать редукцию с интегральным переходом, построить последовательности приближенных решений с помощью итерационного метода и оценить их динамику.

Гипотеза исследования: редукция нелинейного уравнения Хопфа к нагруженным и интегральным формам в сочетании с итерационным процессом позволяет строить приближенные решения, адекватно описывающие динамику исходной задачи.

Методы исследования: прямое редуцирование и линеаризация уравнения, интегрирование с использованием теоремы о среднем значении интеграла, итерационный метод последовательных приближений, вычисления и визуализация с помощью пакета *Maple*.

Достигнутые результаты: разработаны алгоритмы редукции и построены три первых приближения решений, демонстрирующие различное поведение: быстрое затухание, переход в отрицательную область и рост. Показано, что интегральные и весовые члены существенно влияют на расхождение приближений, что важно учитывать при интерпретации результатов. Полученные последовательности приближений позволяют анализировать динамику процессов, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями.

### Введение

Будем рассматривать квазилинейное уравнение Хопфа:

$$u_t + uu_x = 0, \quad (1)$$

при условиях:

$$(2)$$

$$u(x, 0) = \varphi(x), \quad x \in [0, l], \quad u(0, t) = \psi(t), \quad t \in [0, T], \quad \varphi(0) = \psi(0).$$

Для уравнения (1) справедливы следующие утверждения:

1) оно является частным случаем уравнения переноса и моделирует течение жидкости с нулевой кинематической вязкостью;

2) оно является моделью одномерного движения облака невзаимодействующих пылинок.

### Непосредственная редукция

Рассмотрим способы редукции нелинейного уравнения (1) к нагруженному уравнению для нахождения приближенного решения.

Редуцируем (1) к нагруженному уравнению методом из источников [1; 2]. Для этого заменим множитель  $u(x, t)$  во втором слагаемом его средним значением на интервале  $[0, l]$ :

$$\bar{u}(t) = \frac{1}{l} \int_0^l u(x, t) dx, \quad (3)$$

что приведет к нагруженному уравнению:

$$u_t + \bar{u}u_x = 0. \quad (4)$$

Интегрируя его по  $x$ , получим соотно-

шение:

$$\bar{u}(u(x,t) - u(0,t)) = - \int_0^x u_t(\xi,t) d\xi,$$

от которого легко перейти к нагруженному уравнению:

$$\bar{u}(u(x,t) - u(0,t)) = - \frac{x}{l} \int_0^l u_t(x,t) dx.$$

Учитывая условия (2), запишем:

$$u = \psi(t) - \frac{x}{l} \frac{\bar{u}'}{\bar{u}}.$$

Применим формулу (3) к данному выражению, получим уравнение:

$$\bar{u}' + 2\bar{u}^2 - 2\psi\bar{u} = 0. \quad (5)$$

Начальное условие для его интегрирования получим из (2):

$$\bar{u}(0) = \frac{1}{l} \int_0^l u(x,0) dx = \frac{1}{l} \int_0^l \varphi(x) dx. \quad (6)$$

Решение задачи (5), (6) позволяет линеаризовать уравнение (4) путем подстановки в него функции  $\bar{u}(t)$ . Решая, в свою очередь, линейное уравнение (4) при условиях (2), найдем функцию  $u^{(0)}$ , которую примем за стартовое приближение в методе последовательных приближений Эйлера:

$$u_t^{(k)} + u^{(k-1)} u_x^{(k)} = 0, \quad k=1, 2, \dots,$$

$$u^{(k)}(x,0) = \varphi(x), \quad x \in [0, l], \quad u^{(k)}(0,t) = \psi(t), \quad t \in [0, T], \quad \varphi(0) = \psi(0).$$

Можно заметить, что нелинейное уравнение (5) не является тривиальным для интегрирования. Применим к нему повторную редукцию (см. [1]), для его линеаризации. С этой целью воспользуемся преобразованием:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{u}(t) dt = \frac{1}{lT} \int_0^T \int_0^l u(x,t) dx dt, \quad (7)$$

приводящим (5) к виду:

$$\bar{u}' = 2(\psi\bar{u} - \bar{u}^2).$$

Это уравнение легко интегрируется и имеет

общее решение:

$$\bar{u}(t) = 2\bar{u} \int \psi(t) dt - 2\bar{u}^2 t + C. \quad (8)$$

Применяя к (8) преобразование (7), перейдем к алгебраическому уравнению:

$$\bar{u}^2 + \frac{1}{T^2} \left( T - 2 \int_0^T \int_0^l \psi(t) dx dt \right) \bar{u} - \frac{C}{T} = 0. \quad (9)$$

Находя из (7) значение  $\bar{u}$  при соответствующем подборе  $C$  и подставляя его в (8), найдем функцию  $\bar{u}$ . Ее, в свою очередь, подставим в (4) для нахождения  $u^{(0)}$  в описанном выше итерационном процессе.

Пример 1. Пусть в условиях (2):

$$\varphi(x) = 1, \quad \psi(t) = 1.$$

Тогда функция  $\bar{u}(t) = th(2t+6)$  является решением уравнения (5) и позволяет найти:

$$u(x,t) = u^{(0)}(x,t) = ch(2t+6) \left( \psi(t) - \frac{4x}{ch(2t+6)-1} \right).$$

Для упрощения вида функции  $u^{(0)}$  применим вторую редукцию. Положим  $l = T = 1$ , тогда (9) дает  $\bar{u} = \pm\sqrt{C}$ . В данном случае  $C \geq 0$ . Предположим, что  $C = 1$ , тогда  $\bar{u} = \pm 1$ . Для определенности положим  $\bar{u} = -1$  и по формуле (8) найдем  $\bar{u}(t) = 1 - 4t$ . Тогда уравнение  $u_t + \bar{u}u_x = 0$  принимает вид:

$$u_t + (1-4t)u_x = 0.$$

В качестве его решения применим линейную форму его первого интеграла, что приводит к функции:

$$u^{(0)}(x,t) = -2t^2 + t - x.$$

Приведем первые три приближения, найденные с помощью пакета символьных вычислений Maple:

$$u^{(1)}(x,t) = (2t^2 - 5t + x + 5)e^t,$$

$$u^{(2)}(x,t) = xe^{-e^t} - \int (2t^2 - 5t + 5)e^{t-e^t} dt, \quad (10)$$

$$u^{(3)}(x,t) = xe^{Ei(e^t)} + \int e^{Ei(e^t)} \int (2t^2 - 5t + 5)e^{t-e^t} dt dt,$$

в которых используется экспоненциальный интеграл:

$$Ei(z) = \int_1^{\infty} \sigma^{-1} e^{-\sigma z} d\sigma.$$

**Редукция интегрированием**

В этом способе основной операцией является интегрирование нелинейного уравнения. Для его применения представим уравнение (1) в виде:

$$2u_t + (u^2)_x = 0.$$

После его интегрирования и последующего применения теоремы о среднем значении интеграла будет получено нагруженное уравнение:

$$u^2(x, t) = u^2(0, t) - \frac{2x}{l} \int_0^l u_t(x, t) dx.$$

С помощью (2) и (3) от последнего перейдем к уравнению:

$$u^2(x, t) = \psi^2(t) - 2x\bar{u}'. \tag{11}$$

Его интегрирование по  $x \in [0, l]$  приводит к интегралу:

$$\int_0^l u^2 dx = l\psi^2(t) - l^2\bar{u}'(t).$$

Так как левая часть неотрицательна, то:

$$\bar{u}'(t) \leq \frac{1}{l} \psi^2(t). \tag{12}$$

Потребуем от  $\bar{u}(t)$ , чтобы она удовлетворяла утверждению [3].

Функция  $y(t)$ , определенная на промежутке  $[a, b]$ , называется решением неравенства  $y'(t) \leq f(t, y) \forall t \in [a, b]$ , где  $f, f_y' \in C(G)$  в некоторой области  $G \subset R^2$ , если выполнены условия: 1)  $y(t) \in C^1[a, b]$ ; 2) график  $y(t)$  лежит в  $G$  при  $t \in [a, b]$ .

Тогда все решения последнего неравенства выражаются через общее решение уравнения  $y'(t) = f(t, y)$ , зависящего от некоторой гладкой функции.

Применим их к (12), что дает возможность найти функцию  $\bar{u}(t)$ . Ее подстановка в (13) позволяет получить стартовое приближение в итерационном процессе поис-

ка приближенных решений исходного уравнения.

Пример 2. Пусть в условиях (2):

$$\varphi(x) = 1, \psi(t) = 1.$$

Из источников [3; 4] следует, что решение неравенства (12) можно представить в виде:

$$\bar{u}(t) = t + C(t),$$

с произвольной гладкой невозрастающей функцией  $C(t)$ .

Выберем  $C(t) = -t$ , что приводит к  $\bar{u}(t) = 0$ , а (11), в свою очередь, дает  $u = \pm 1$ . Пусть  $u = 1$  тогда (4)  $u_t + u_x = 0$ . Его решение типа бегущей волны  $u(x, t) = t - x$  [5] примем за начальное приближение  $u^{(0)}$ .

Приведем три приближения, найденные в системе Maple:

$$u^{(1)}(x, t) = -(t - x - 1)e^t,$$

$$u^{(2)}(x, t) = xe^{-e^t} + \int (t-1)e^{t-e^t} dt,$$

$$u^{(3)}(x, t) = xe^{Ei(e^t)} - \int e^{Ei(e^t)} \int (t-1)e^{t-e^t} dt dt.$$

Таким образом, построена последовательность функций, аппроксимирующих решение задачи (1), (2). Можно заметить, что соответствующие члены последовательностей (10) и (13) отличаются главным образом степенью многочлена под интегралом.

Построим график функции, показывающий направление движения приближений  $u^{(1)}$ ,  $u^{(2)}$  и  $u^{(3)}$ . Для его построения необходимо сперва вывести табличные значения для построения графиков функции. Для вычисления табличных значений  $u^{(1)}$  используется функция:

$$u^{(1)}(t) = xe^{-e^t}.$$

Соответственно, для  $u^{(2)}$ :

$$I_{10}(t) = \int_0^t (2\tau^2 - 5\tau + 5)e^{\tau - e^\tau} d\tau,$$

$$u^{(2)}(t) = xe^{-e^t} - I_{10}(t),$$

где  $I_{10}(t)$  является внутренним интегралом.

Соответственно, для  $u^{(3)}$ :

Таблица 1. Табличные значения для построения графиков функции

$t$	$u^{(1)}$	$u^{(2)}$	$u^{(3)}$
0,0	0,367879	0,367879	1,24531
0,2	0,294816	-0,0360342	1,20635
0,4	0,224962	-0,363729	1,25282
0,6	0,161683	-0,617676	1,36034
0,8	0,108009	-0,805217	1,51068
1,0	0,065988	-0,936888	1,69042
1,2	0,0361486	-1,02434	1,88979
1,4	0,017332	-1,07862	2,10177
1,6	0,00706196	-1,10938	2,32138
1,8	0,00235869	-1,12472	2,54514
2,0	0,000617979	-1,13112	2,77087

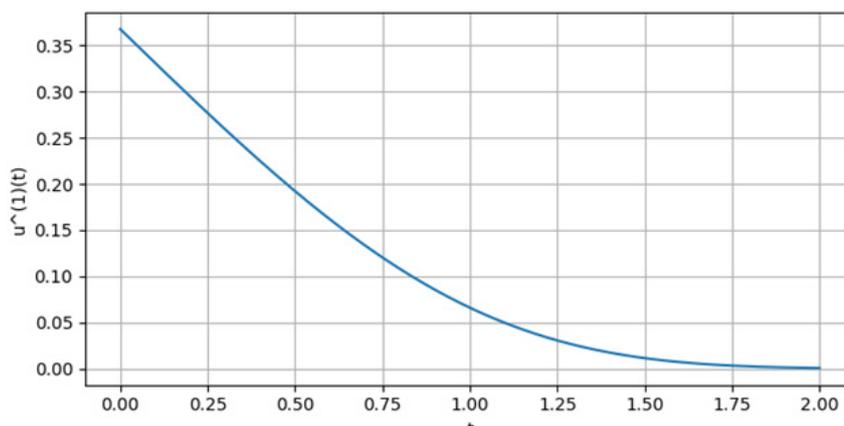


Рис. 1. График функции  $u^{(1)}t$

$$J_{10}(t) = \int_0^t e^{E_1(\epsilon^s)} I_{10}(s) ds,$$

$$u^{(3)}(t) = xe^{E_1(\epsilon^t)} + J_{10}(t),$$

где  $I_{10}(t)$  – внешний интеграл (10).

Стоит отметить, что в данном случае используются экспоненциальные интегралы  $Ei(z)$  и  $E_1(z)$ . Классический экспоненциальный интеграл  $Ei(z)$  задается формулой:

$$Ei(z) = PV \int_{-\infty}^z \frac{e^s}{s} ds,$$

где  $PV$  – главное значение интеграла (особенность при  $s = 0$ ).

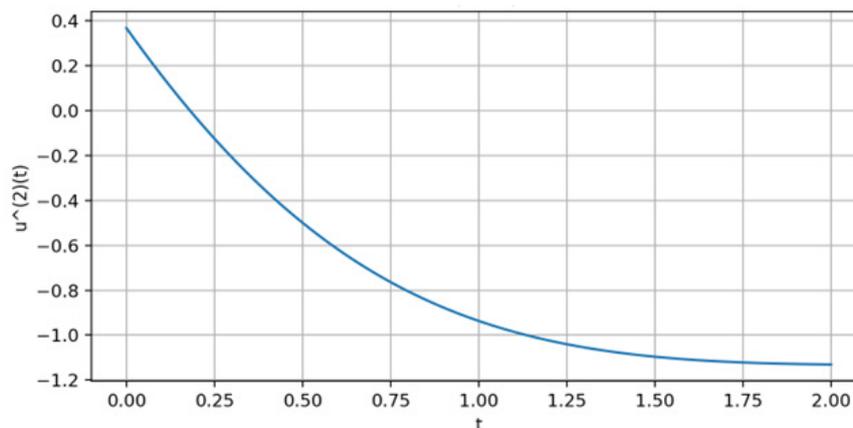
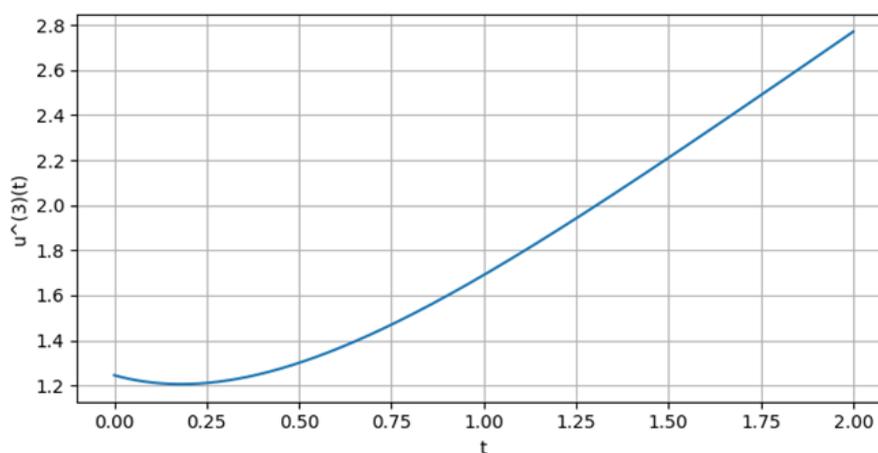
Кроме того, для  $ReZ > 0$  вводится функция:

$$E_1(z) = \int_1^{\infty} \frac{e^{-sz}}{\sigma} dE_1(z) = \int_z^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt E_1(z) = \int_z^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt Ei(-x) = -E_1(x),$$

$x > 0$ .

После выведения табличных значений (табл. 1) построим график функции для  $u^{(1)}$ ,  $u^{(2)}$  и  $u^{(3)}$  соответственно (рис. 1–3), затем сравним их в одной системе координат (рис. 4).

На построенных графиках видно (рис. 4), что первое приближение ведет себя как быстро

Рис. 2. График функции  $u^{(2)}t$ Рис. 3. График функции  $u^{(3)}t$ 

затухающая по времени функция: оно остается положительным и очень быстро стремится к нулю по мере роста времени. Второе приближение в начале совпадает с первым, но затем начинает заметно от него отклоняться, довольно рано пересекая нулевое значение и переходит в отрицательную область. Дальше оно удерживается на отрицательных значениях и по модулю становится существенно больше первого приближения, поскольку вклад базового затухающего множителя становится пренебрежимо малым по сравнению с накопленным интегральным вкладом.

Третье приближение демонстрирует противоположную тенденцию: оно остается положительным на всем рассматриваемом интервале и монотонно возрастает. Рост связан с тем, что в этой формуле присутствует весовой множи-

тель, который не приводит к затуханию, а интегральная часть добавляет накопительный вклад. В результате к концу интервала третье приближение оказывается заметнее первого и второго.

### Выводы

В выбранном диапазоне времени наблюдается не сближение всех трех кривых, а их расхождение по масштабу и даже по знаку: первое приближение быстро вырождается к нулю, второе уходит в отрицательные значения, а третье растет вверх.

При интерпретации результатов их необходимо учитывать, поскольку сравнение приближений как последовательности, стремящейся к одной и той же функции, требует либо выбора

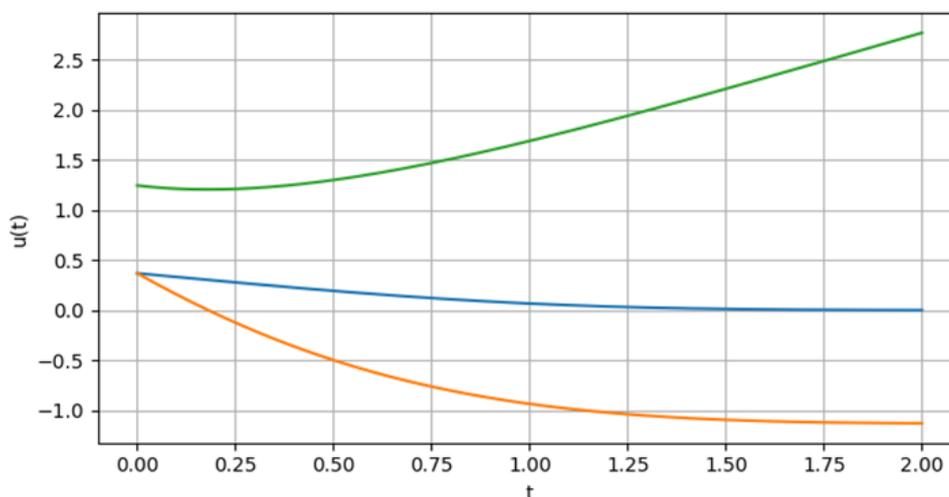


Рис. 4. Общий график функции  $u^{(1)}t$  (синий),  $u^{(2)}t$  (оранжевый) и  $u^{(3)}t$  (зеленый)

интервала, на котором влияние накопительных либо согласования нормировки и начальных членов пока не становится доминирующим, условий.

### Список литературы

1. Бозиев, О.Л. Решение начально-краевой задачи для нелинейного гиперболического уравнения с помощью двойной редукции к нагруженным уравнениям / О.Л. Бозиев // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2014. – № 4(60). – С. 7–13.
2. Бозиев, О.Л. Применение нагруженных уравнений к приближенному решению дифференциальных уравнений в частных производных со степенной нелинейностью / О.Л. Бозиев // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика. – 2015. – № 1. – С. 127–136.
3. Ильин, Ю.А. Общие вопросы интегрирования дифференциальных неравенств в явном виде / Ю.А. Ильин // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2017. – Т. 4(62). – Вып. 4. – С. 597–607.
4. Ильин, Ю.А. Об интегрировании дифференциальных неравенств в явном виде / Ю.А. Ильин // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2015. – № 1. – С. 39–61.
5. Лобанов, А.И. Численные методы решения уравнений в частных производных / А.И. Лобанов, И.Б. Петров // ИНТУИТ.

### References

1. Boziyev, O.L. Resheniye nachal'no-krayevoy zadachi dlya nelineynogo giperbolicheskogo uravneniya s pomoshch'yu dvoynoy reduktsii k nagruzhennym uravneniyam / O.L. Boziyev // Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN. – 2014. – № 4(60). – S. 7–13.
2. Boziyev, O.L. Primeneniye nagruzhennykh uravneniy k priblizhennomu resheniyu differentsial'nykh uravneniy v chastnykh proizvodnykh so stepennoy nelineynost'yu / O.L. Boziyev // Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Prikladnaya matematika. – 2015. – № 1. – S. 127–136.
3. Il'in, YU.A. Obshchiye voprosy integrirovaniya differentsial'nykh neravenstv v yavnom vide / YU.A. Il'in // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Astronomiya. – 2017. – T. 4(62). – Vyp. 4. – S. 597–607.
4. Il'in, YU.A. Ob integrirovanii differentsial'nykh neravenstv v yavnom vide /

YU.A. Il'in // *Differentsial'nyye uravneniya i protsessy upravleniya*. – 2015. – № 1. – S. 39–61.

5. Lobanov, A.I. *Chislennyye metody resheniya uravneniy v chastnykh proizvodnykh* / A.I. Lobanov, I.B. Petrov // INTUIT.

---

© О.Л. Бозиев, М.Б. Губашиев, 2026

УДК 681.518:621.891

Т.В. БЫЧКОВА, Д.А. БЕЗИК

ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет», г. Брянск

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ДВУХСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ

*Ключевые слова:* демпфирование колебаний; метод конечных разностей; многослойные покрытия; переходные зоны; цилиндрические оболочки; *MATLAB* моделирование.

*Аннотация.* Целью исследования является создание математической модели для оценки влияния переходных зон между слоями покрытия на демпфирующие свойства цилиндрической конструкции. В основу работы положена гипотеза о том, что межфазные переходные области характеризуются повышенным коэффициентом диссипации энергии по сравнению с объемными материалами слоев. Методология исследования включает одномерное моделирование радиальных колебаний вязкоупругого составного цилиндра. Численное решение задачи выполнено методом конечных разностей с интегрированием по времени по алгоритму Верле. Результаты численного моделирования, проведенного в среде *MATLAB* подтвердили, что для адекватной оценки и оптимизации демпфирующих свойств многослойных покрытий необходим учет свойств переходных зон.

### Введение

Расширение эксплуатационных характеристик и увеличение срока службы цилиндрических конструкций (валов, трубопроводов) является важной научно-технической задачей. Одним из эффективных методов решения этой задачи является нанесение многослойных покрытий, которые позволяют защищать поверхность от коррозии и износа, а также подавлять вибрации благодаря демпфирующим свойствам многослойных покрытий [4]. Особую сложность представляет собой адекватное описание

поведения материалов на границах раздела слоев, где происходит скачкообразное изменение механических свойств, что может приводить к концентрации напряжений и преждевременному разрушению [3]. Традиционные модели многослойных систем часто предполагают резкую границу раздела между материалами, что приводит к неадекватной оценке демпфирующих свойств. В реальности вследствие технологических особенностей нанесения покрытий образуются переходные области, в которых свойства материалов меняются плавно. Эти зоны могут оказывать существенное влияние на диссипацию энергии колебаний, хотя имеют малую ширину (около 50 мкм). Демпфирование в переходных зонах выше, чем в основном материале [5].

Целью настоящей статьи являются разработка математической модели, учитывающей переходные зоны в двухслойных покрытиях, и исследование их влияния на демпфирующие свойства системы.

### Математическая модель

Рассматривается осесимметричный цилиндр (подложка) толщиной  $h_0$  и внешним радиусом  $R_s$ , на который последовательно нанесены два слоя покрытия толщиной  $h_1$  и  $h_2$  соответственно. Таким образом, внешний радиус составляет  $R_{e, \text{кл}} = R_s + h_1 + h_2$ .

Принимаются следующие допущения: материалы подложки и слоев являются изотропными и линейно-вязкоупругими, деформации являются малыми, влияние температуры на свойства материалов не учитывается.

Для описания плавного изменения механических свойств в переходных зонах используются специальные аппроксимирующие функции. Изменение модуля Юнга моделируется сигмоидальной функцией:

$$E(r) = E_1 + (E_2 - E_1) \cdot \Phi(r), \quad (1)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – модули Юнга первого и второго слоев соответственно;  $\Phi(r)$  – функция перехода:

$$\Phi(r) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{r - R_0}{\delta}\right)}, \quad (2)$$

где  $r$  – текущая радиальная координата;  $R_0$  – координата границы раздела;  $\delta$  – параметры ширины переходной зоны.

Коэффициент внутреннего вязкого трения  $\eta$  описывается комбинированной функцией, содержащей множители: первый обеспечивает плавный переход базовых значений демпфирования, второй моделирует локальное увеличение диссипации в переходной зоне (гауссов «всплеск»):

$$\eta(r) = \left[ \eta_1 + \frac{\eta_2 - \eta_1}{1 + \exp\left(-\frac{r - R_0}{\mu}\right)} \right] \cdot \left( 1 + \nu \cdot \exp\left(-\frac{(r - R_0)^2}{\xi^2}\right) \right), \quad (3)$$

где  $\eta_1$  и  $\eta_2$  – коэффициенты вязкого трения первого и второго слоев;  $\mu$  и  $\xi$  – параметры ширины переходной зоны;  $\nu$  – параметр «всплеска» коэффициента вязкого трения в переходной зоне.

Для описания вязкоупругого поведения материалов слоев используется стандартная линейная модель (модель Зенера) [1]:

$$\sigma + \tau_\sigma \frac{\partial \sigma}{\partial t} = E_r \left( \varepsilon + \tau_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right), \quad (4)$$

где  $\tau_\sigma$  и  $\tau_\varepsilon$  – время релаксации напряжения и деформации соответственно ( $\tau_\varepsilon < \tau_\sigma$ );  $E_r$  – равновесный модуль упругости.

Для объемного напряженного состояния вязкоупругие свойства проявляются в сдвиговых деформациях, тогда как объемные деформации остаются упругими. Деформации определяются через радиальное перемещение  $u(r, t)$ :

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u}{r}. \quad (5)$$

Система описывается уравнением движения в цилиндрических координатах с учетом частотно-зависимого демпфирования. Начальные условия соответствуют возбуждению свободных колебаний:

$$u(r, 0) = u_0 \sin\left(\pi \frac{r - R_s}{R_{ext} - R_s}\right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(r, 0) = 0,$$

граничные условия – свободная поверхность.

Модель рассматривает радиальное движение (колебания) стенки составного цилиндра и реализована численно методом конечных разностей с равномерной пространственной дискретизацией.

### Реализация модели и обсуждение результатов

При реализации математической модели в среде *MATLAB* были приняты следующие упрощения, позволившие существенно сократить вычислительную сложность задачи без потери физической адекватности: трехмерная цилиндрическая задача была сведена к одномерному рассмотрению вдоль радиальной координаты. Для численного интегрирования используется метод конечных разностей с равномерной сеткой из 500 узлов по радиусу с шагом  $\Delta r = 2,2 \times 10^{-5}$  м. Интегрирование по времени осуществляется методом Верле с шагом  $\Delta t = 10^{-6}$  с на общем интервале 0,5 с, что соответствует 500 000 шагов интегрирования.

Алгоритм расчета включает в себя инициализацию сетки и материальных свойств с учетом переходных зон, расчет начальных перемещений и скоростей. Для каждого временного шага рассчитываются деформации, напряжения (по модели Зенера), ускорения с учетом демпфирования, интегрирование уравнений движения. Затем проводится регистрация перемещений контрольных точек и спектральный анализ полученных временных рядов.

Геометрические параметры системы: толщина стальной подложки  $h_0 = 0,01$  м, внутренний радиус  $R_s = 0,25$  м, толщина первого слоя (медь)  $h_1 = 0,0005$  м (500 мкм), толщина второго слоя (алюминий)  $h_2 = 0,0005$  м (500 мкм), длина цилиндра  $L = 0,1$  м,  $\tau_\sigma = 0,0002$  с,  $\tau_\varepsilon = 0,001$  с, времена релаксации напряжения и деформа-

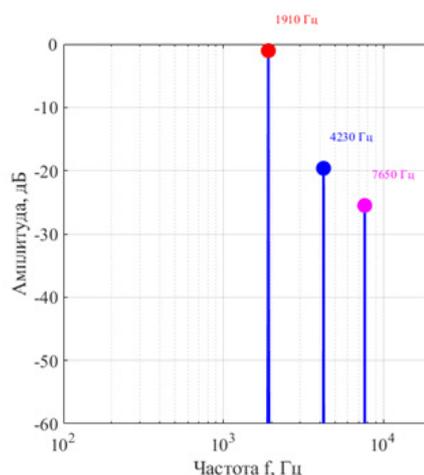


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика системы

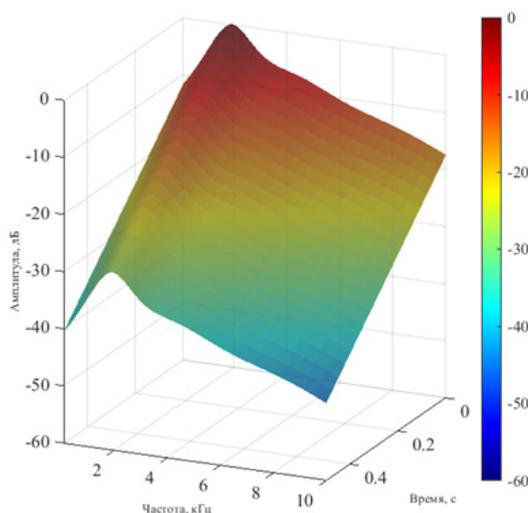


Рис. 2. 3D амплитудно-частотная характеристика системы

ции,  $\mu = \delta = 25$  мкм – параметры ширины,  $\xi = \delta/3 = 17$  мкм – параметр ширины гауссова «всплеска», амплитуда всплеска демпфирования  $\nu = 3,0$ ,  $u_0 = 10^{-6}$  м. Материал подложки – сталь, покрытия – медь, алюминий.

Результаты моделирования показали плавное распределение механических свойств в системе с характерными «всплесками» коэффициента демпфирования в переходных зонах. Максимальное значение коэффициента демпфирования ( $\zeta = \lambda/(2\pi)$ , где  $\lambda$  – декремент затухания) в межфазных областях достигает 0,045, что в три раза превышает базовые значения материалов.

Амплитудно-частотная характеристика системы представлена на рис. 1. Спектральный анализ выявил три ярко выраженные резонансные частоты: основная частота  $f_1 = 1\,910$  Гц, вторая мода  $f_2 = 4\,230$  Гц, третья мода  $f_3 = 7\,650$  Гц.

Добротность первого резонансного пика  $Q = 0,50$ . Такое значение добротности ( $Q < 1$ ) свидетельствует о сильном демпфировании системы. Ширина полосы резонанса превышает резонансную частоту, что характерно для систем с высоким внутренним трением.

Амплитуды высших мод колебаний на 15–20 дБ ниже основной, что подтверждает эф-

Таблица 1. Энергетический анализ рассеивания

Компонент системы	Объемная доля, %	Доля рассеяния, %
Стальная подложка	90,7	10,0
Медный слой	4,6	25,0
Алюминиевый слой	4,6	30,0
Переходные зоны	0,9	35,0
Всего	100,0	100,0

фективное демпфирование высокочастотных составляющих (рис. 1).

Логарифмический декремент затухания, рассчитанный по огибающей колебаний внешней поверхности, составил  $\lambda = 0,21$ . Соответствующий коэффициент демпфирования  $\zeta = 0,033$ . Постоянная времени затухания  $\tau = 0,15$  с, время полузатухания  $T_{1/2} = \tau \cdot \ln(2) = 0,10$  с.

Для исследования динамики демпфирующих свойств во времени был проведен анализ эволюции спектра колебаний. Сигнал перемещения внешней поверхности  $u(t)$  был разделен на 20 временных сегментов одинаковой длины. Для каждого сегмента рассчитывался амплитудный спектр с применением окна Ханна [2]. Отсутствие сдвига резонансных частот во времени свидетельствует о линейности системы. Анализ колебаний системы позволяет выявить следующие особенности: основная резонансная частота 1 910 Гц сохраняется на протяжении всего процесса затухания, что свидетельствует о линейности системы (рис. 2). Амплитуда всех резонансных пиков экспоненциально уменьшается во времени, причем скорость затухания различных мод колебаний примерно одинакова. Полученные данные свидетельствуют о том, что демпфирующая способность системы возрастает с увеличением частоты колебаний, что является характерным свойством вязкоупругих материалов.

Энергетический анализ системы показал,

что на переходные зоны, занимающие всего 0,9 % общего объема, приходится 35 % всей рассеянной энергии (табл. 1). Это подтверждает высокую эффективность межфазных областей для диссипации энергии колебаний.

Исследование зависимости добротности от ширины переходной зоны выявило оптимальное значение ширины переходной зоны 50 мкм, при котором демпфирующая способность системы максимальна. При меньших ширинах не реализуется полный потенциал диссипации. При этой ширине добротность системы достигает минимального значения  $Q = 0,50$ , что соответствует максимальному демпфированию.

## Выводы

Разработана математическая модель демпфирующих свойств двухслойных покрытий на цилиндрических подложках, учитывающая переходные зоны между материалами. Выбрана оптимальная ширина переходных зон, обеспечивающая минимальную добротность. Разработан эффективный алгоритм численного решения на основе метода конечных разностей и модели Зенера. Результаты работы могут быть использованы при проектировании виброзащитных покрытий для трубопроводов и оптимизации многослойных конструкций в машиностроении.

## Список литературы

1. Бозиев, О.Л. Решение начально-краевой задачи для нелинейного гиперболического уравнения с помощью двойной редукции к нагруженным уравнениям / О.Л. Бозиев // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2014. – № 4(60). – С. 7–13.
2. Бозиев, О.Л. Применение нагруженных уравнений к приближенному решению дифференциальных уравнений в частных производных со степенной нелинейностью / О.Л. Бозиев // Вест-

ник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика. – 2015. – № 1. – С. 127–136.

3. Ильин, Ю.А. Общие вопросы интегрирования дифференциальных неравенств в явном виде / Ю.А. Ильин // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2017. – Т. 4(62). – Вып. 4. – С. 597–607.

4. Ильин, Ю.А. Об интегрировании дифференциальных неравенств в явном виде / Ю.А. Ильин // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2015. – № 1. – С. 39–61.

5. Лобанов, А.И. Численные методы решения уравнений в частных производных / А.И. Лобанов, И.Б. Петров // ИНТУИТ.

### References

1. Boziyev, O.L. Resheniye nachal'no-krayevoy zadachi dlya nelineynogo giperbolicheskogo uravneniya s pomoshch'yu dvoynoy reduksii k nagruzhennym uravneniyam / O.L. Boziyev // Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN. – 2014. – № 4(60). – S. 7–13.

2. Boziyev, O.L. Primeneniye nagruzhennykh uravneniy k priblizhennomu resheniyu differentsial'nykh uravneniy v chastnykh proizvodnykh so stepennoy nelineynost'yu / O.L. Boziyev // Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Prikladnaya matematika. – 2015. – № 1. – S. 127–136.

3. Il'in, YU.A. Obshchiye voprosy integrirvaniya differentsial'nykh neravenstv v yavnom vide / YU.A. Il'in // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Astronomiya. – 2017. – Т. 4(62). – Вып. 4. – S. 597–607.

4. Il'in, YU.A. Ob integrirvanii differentsial'nykh neravenstv v yavnom vide / YU.A. Il'in // Differentsial'nyye uravneniya i protsessy upravleniya. – 2015. – № 1. – S. 39–61.

5. Lobanov, A.I. Chislennyye metody resheniya uravneniy v chastnykh proizvodnykh / A.I. Lobanov, I.B. Petrov // INTUIT.

---

© Т.В. Бычкова, Д.А. Безик, 2026

УДК 629.7.036:621.352:004.94

А.И. КАРАЧЕНЦЕВ<sup>1</sup>, П.Л. ВОРОНОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>ZeroAvia Limited, д. Кембл (Англия);<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Чувацкий государственный университет имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОРОДНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ПОД АВИАЦИОННЫМИ НАГРУЗКАМИ: ЧИСЛЕННЫЙ ПОДХОД И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

*Ключевые слова:* авиационные нагрузки; водородная силовая установка; математическое моделирование; программный комплекс; прочность; ресурс; численные методы; электрическая двигательная установка.

*Аннотация.* В статье рассматривается комплексная методология математического моделирования прочности и ресурса водородных электрических силовых установок (ВЭСУ) для авиационного применения. Основное внимание уделено численному подходу, интегрирующему многофизичное моделирование рабочих процессов, анализ напряженно-деформированного состояния критических компонентов (баков хранения водорода, топливных элементов, систем управления) и оценку их низкоцикловой и высокоцикловой усталости в условиях характерных для авиации нагрузок. Представлена архитектура специализированного программного комплекса, реализующего предложенную методологию. Приведены результаты верификационных расчетов, демонстрирующие влияние параметров полетного цикла на остаточный ресурс стенки композитного баллона высокого давления. Показана эффективность применения разработанного инструмента для оптимизации конструкций ВЭСУ на ранних этапах проектирования.

### Введение

Трансформация авиационной отрасли в направлении декарбонизации обуславливает

интенсивные исследования ВЭСУ. ВЭСУ, объединяющие системы хранения водорода (криогенные танки или баллоны высокого давления), топливные элементы или водородные турбоэлектрические генераторы, электродвигатели и системы управления, представляют собой сложные многофизичные системы [1]. Их внедрение в авиацию сопряжено с уникальными вызовами, связанными с обеспечением надежности, безопасности и долговечности в условиях жестких эксплуатационных нагрузок: переменного внутреннего давления, вибраций, термоциклирования, воздействия пониженных температур и остаточной атмосферы [2].

Традиционные подходы к проектированию, основанные на значительном объеме натурных испытаний, для новых технологий становятся чрезмерно затратными и длительными. В этой связи актуальной задачей является разработка методов математического моделирования, позволяющих с достаточной точностью прогнозировать прочностные и ресурсные характеристики ВЭСУ на этапе концептуального и эскизного проектирования. Данная статья посвящена описанию такого численного подхода и его программной реализации, фокусируясь на моделировании отклика критических компонентов на типичные авиационные нагрузки.

### Методология и математический аппарат

Методология основана на последовательном применении итеративной цепочки моделей, переходящих от системного уровня к детальному компонентному анализу. Первым этапом является формирование расчетного полетного

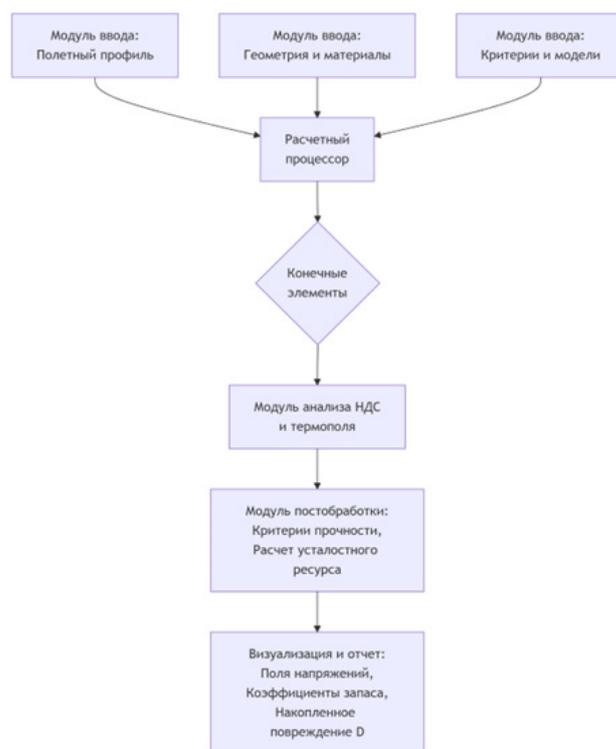


Рис. 1. Архитектура программного комплекса

цикла, определяющего внешние воздействия на ВЭСУ.

Для транспортного самолета регионального класса был принят типовой полетный профиль, включающий взлет, набор высоты, крейсерский полет, снижение и посадку. На каждом участке профиля параметризуются ключевые воздействия: эквивалентный уровень вибрационных перегрузок  $n_v$  (в долях  $g$ ), характерный диапазон частот  $f$ , температура окружающей среды  $T_{env}$  и ее градиент  $\Delta T/\Delta t$ . Для баков с жидким водородом (ЛХ2) критическим является параметр скорости испарения ( $BOR$ ), определяющий рост давления в изолированном объеме. Динамика внутреннего давления  $P_{int}(t)$  в баллоне высокого давления или криогенном баке моделируется на основе уравнения состояния и баланса массы, учитывающего расход водорода топливным элементом.

Критические компоненты ВЭСУ, такие как сосуды давления и теплообменники, рассматриваются в рамках связанных задач механики деформируемого твердого тела и теплопередачи. Уравнение теплопроводности для анизотропных материалов (композиты) решается совмест-

но с уравнениями равновесия:

$$\nabla \cdot (C: \nabla u) = -f_g - f_T$$

$$f_T = \nabla \cdot (C: \alpha \nabla T),$$

где  $C$  – тензор упругих постоянных;  $u$  – вектор перемещений;  $f_v$  – объемные силы;  $\alpha_a$  – тензор коэффициентов температурного расширения;  $\Delta T$  – поле температур относительно референсного состояния. Для композитного слоя баллона (например, из углеродного волокна и эпоксидной матрицы) определяется редуцированная жесткость с учетом ориентации слоев.

Для оценки статической прочности композитных оболочек используется критерий Цай-Ву [3]. Для прогнозирования ресурса применяются модели усталости. Низкоцикловая усталость (НЦУ), инициируемая крупными циклами давления при каждом полете, оценивается по кривым Мэнсона-Кохффина в форме:

$$\frac{\Delta \epsilon_{pl}}{2} = \epsilon_f' (2N_f)^2,$$

где  $\Delta \epsilon_{pl}$  – пластическая деформация за цикл;

Таблица 1. Расчетный ресурс композитного баллона ВЭСУ в зависимости от рабочего давления

Рабочее давление, МПа (макс.)	Амплитуда напряжения в критич. точке, МПа	Число циклов до разрушения (НЦУ), тыс.	Накопленное повреждение за полет (ВЦУ), $\times 10^{-6} \times 10^{-6}$	Суммарный ресурс (при $D_{ВЦУ}$ ), тыс. полетов
35	1 050	150,0	2,1	~476,2*
50	1 500	35,5	5,8	~172,4*
70	2 100	6,2	15,6	~64,1*

\*Ресурс лимитирован низкоцикловою усталостью, так как  $1/N_{НЦУ} \gg D_{ВЦУ}$

$\epsilon_f'$  и  $c$  – константы усталости материала;  $N_f$  – число циклов до разрушения. Высокоцикловая усталость (ВЦУ) от вибрационных нагрузок анализируется с помощью подхода на основе кривых Велера ( $S-N$ ) и линейного правила суммирования повреждений Майнера [4]:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i(S_i)}$$

где  $D$  – накопленное повреждение (отказ при  $D \geq 1$ );  $n_i$  – число циклов с амплитудой напряжения  $S_i$ ;  $N_i$  – число циклов до разрушения при амплитуде  $S_i$ , определяемое по кривой  $S-N$ .

### Программная реализация и алгоритмы

Для автоматизации процесса анализа разработан прототип программного комплекса на языке *Python* с использованием библиотек *NumPy*, *SciPy* и *FEniCS* для решения дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов (МКЭ). Архитектура комплекса модульная приведена на рис. 1.

Алгоритм работы включает: 1) предпроцессорную подготовку сетки; 2) решение связанной термомеханической задачи в квазистатической постановке для серии дискретных временных точек полетного цикла; 3) постпроцессорный анализ полученных полей напряжений-деформаций; 4) вычисление коэффициента запаса по статической прочности и накопленного усталостного повреждения  $D$  для каждой точки конструкции.

### Результаты и обсуждение

В качестве объекта исследования принята модель цилиндрической части композитного баллона высокого давления (*Type IV*) с полимерной подложкой и оболочкой из углепластика. Давление изменялось по циклу, имитирующему взлет-посадку, с суперпозицией гармонической вибрационной нагрузки 100 Гц.

Расчет МКЭ выявил концентрацию меридиональных напряжений в зоне контакта цилиндрической части с торцевой заглушкой. Максимальные эквивалентные напряжения фон Мизеса в полимерной подложке составили 45 МПа, в композитном слое – 1 200 МПа (направление по волокну). Коэффициент запаса по критерию Цай-Ву для композитной оболочки составил 1,8, что удовлетворяет требованиям норм.

На основе гистограммы размахов напряжений, полученной из временной реализации, было рассчитано накопленное повреждение  $D$  по правилу Майнера. Основной вклад в повреждение внесли низкоцикловые нагрузки от цикла давления. Результаты оценки ресурса (количество полетных циклов до достижения  $D = 1$ ) в зависимости от амплитуды рабочего давления представлены в табл. 1.

Расчеты показали, что даже при существенном запасе статической прочности ресурс по усталости может быть ограничивающим фактором. Повышение рабочего давления с 35 до 70 МПа для увеличения удельной энергоемкости приводит к почти восьмикратному сокращению расчетного ресурса баллона. Это подтверждает необходимость комплексного усталостного анализа на этапе выбора параметров работы ВЭСУ.

Таблица 2. Сводные результаты конечно-элементного анализа компонентов ВЭСУ

Параметр	Компонент / Материал	Значение	Нормативный предел / Критерий	Вывод
Макс. эквивалентные напряжения (фон Мизеса)	Полимерный лайнер баллона (РА6)	45 МПа	$\sigma_{lim} = 65$ МПа (при $T = -40$ °С)	Запас прочности: $65/45 \approx 1,44$
Макс. эквивалентные напряжения (напр. по волокну)	Композитная оболочка (Углепластик Т700/Ероху)	1 200 МПа	$\sigma_{limfiber} = 2\ 000$ МПа	Запас прочности: $2\ 000/1\ 200 \approx 1,67$
Коэффициент запаса прочности	Композитная оболочка (многоосное нагружение)	1,8	Критерий Цай-Ву (Tsai-Wu), Min допуст. = 1,5	Требования норм соблюдены ( $1,8 > 1,5$ )
Критическая зона	Стык цилиндр/торцевая заглушка	–	–	Область концентрации меридиональных напряжений, требует детального усталостного анализа

### Заключение

Разработан численный подход и программный инструмент для моделирования прочности и ресурса компонентов водородных электрических силовых установок. Методология позволяет количественно оценить влияние параметров полетного цикла на долговечность критических элементов, в частности, сосудов давления. Проведенные расчеты демонстрируют, что для авиационного применения ВЭСУ

выбор рабочего давления является компромиссом между энергоемкостью и усталостным ресурсом.

Полученные результаты являются основой для оптимизации конструкций и режимов эксплуатации. Дальнейшее развитие работы видится в интеграции моделей деградации материалов (например, из-за диффузии водорода в полимеры) и расширении библиотеки моделей компонентов ВЭСУ, включая мембраны топливных элементов и теплообменные аппараты.

### Список литературы

1. Ким, Д.В. Перспективы водородной авиации: анализ технологий силовых установок / Д.В. Ким, С.Х. Ли // Труды ЦИАМ. – 2021. – № 1234. – С. 45–67.
2. Евстратов, А.Ф. Вопросы прочности и безопасности систем хранения водорода в авиационной технике / А.Ф. Евстратов, Г.И. Петров // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2022. – № 5(125).
3. Tsai, S.W. A General Theory of Strength for Anisotropic Materials / S.W. Tsai, E.M. Wu // Journal of Composite Materials. – 1971. – Vol. 5. – P. 58–80.
4. Майнер, М.А. Кумулятивное повреждение при усталости / М.А. Майнер // Труды ASME. Серия E. Прикладная механика. – 1945. – Т. 12. – № 3. – С. 159–164.
5. Басов, К.А. Численные методы в механике композитных материалов / К.А. Басов. – М. : Физматлит, 2019. – 376 с.

### References

1. Kim, D.V. Perspektivy vodorodnoy aviatsii: analiz tekhnologiy silovykh ustanovok / D.V. Kim, S.KH. Li // Trudy TSIAM. – 2021. – № 1234. – S. 45–67.
2. Yevstratov, A.F. Voprosy prochnosti i bezopasnosti sistem khraneniya vodoroda v

aviatsionnoy tekhnike / A.F. Yevstratov, G.I. Petrov // Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. – 2022. – № 5(125).

3. Tsai, S.W. A General Theory of Strength for Anisotropic Materials / S.W. Tsai, E.M. Wu // Journal of Composite Materials. – 1971. – Vol. 5. – P. 58–80.

4. Mayner, M.A. Kumulyativnoye povrezhdeniye pri ustalosti / M.A. Mayner // Trudy ASME. Seriya E. Prikladnaya mekhanika. – 1945. – T. 12. – № 3. – S. 159–164.

5. Basov, K.A. Chislennyye metody v mekhanike kompozitnykh materialov / K.A. Basov. – M. : Fizmatlit, 2019. – 376 s.

---

© А.И. Караченцев, П.Л. Воронов, 2026

УДК 004.934.2:81'342

И.В. ФУРКАЛО, О.М. АНШАКОВ

ФГАОУ ВО «Российский государственный гуманитарный университет», г. Москва

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АВТОРСТВА ТЕКСТА С ПОМОЩЬЮ ЕГО ЗВУКОВОГО ПРОФИЛЯ

*Ключевые слова:* вычислительная лингвистика; обработка поэтических текстов; русский язык; фонетическая транскрипция; *NLP*; *Python*.

*Аннотация.* Статья посвящена разработке метода автоматической атрибуции текстов на основе анализа их фонетических паттернов. Для проверки гипотезы о существовании устойчивого фонетического идиолекта автора реализован алгоритм построения и сравнения звуковых профилей. Эксперимент на корпусе произведений девяти русских поэтов показал корректную атрибуцию в 67 % случаев, что подтверждает потенциал метода, особенно для текстов значительного объема. Результаты вносят вклад в развитие фонетической стилометрии и создают основу для инструментов анализа авторского стиля.

### Введение

Установление авторства анонимного текста – актуальная задача цифровой гуманитаристики, решаемая методами автоматической стилометрии. Эти методы строят статистические модели на основе формальных признаков: частотности слов (лексико-статистические методы), паттернов синтаксиса или *N*-грамм. Такие модели, обученные на текстах с известным авторством, используются для классификации спорных текстов [1].

Особый интерес для атрибуции представляют поэтические тексты, где звуковая организация (фоника) является ключевым компонентом стиля. Индивидуальное тяготение к определенным фонемам и звуковым повторам формирует уникальный рисунок, потенциально выступающий как устойчивая идиолектная характеристика [2].

Однако классические стилометрические подходы имеют системные ограничения. Они сильно зависят от тематики и жанра текста, уязвимы к намеренной стилизации лексикона и игнорируют слабо контролируемые сознанием уровни, такие как фонетические паттерны.

Для преодоления этих ограничений в статье предлагается метод атрибуции на основе звукового (фонетического) профиля текста. Профиль представляет собой вектор частотностей фонетических характеристик, полученный после полной автоматической фонетической транскрипции известных текстов автора. Гипотеза исследования заключается в том, что индивидуальные предпочтения в использовании звуков образуют устойчивый признак авторского стиля, слабо коррелирующий с семантикой. Цель статьи – разработка и экспериментальная проверка соответствующего алгоритма.

Научная новизна работы заключается в: 1) развитии фонетической стилометрии как нового направления за счет смещения анализа на сублексический уровень; 2) эмпирической проверке гипотезы о существовании фонетического идиолекта; 3) междисциплинарном синтезе, связывающем компьютерную стилометрию, фонетику и поэтику; 4) создании датасета звуковых профилей для последующих исследований.

Практическая значимость состоит в создании инструмента для атрибуции анонимных поэтических и прозаических текстов; повышении надежности традиционных методов атрибуции в сложных случаях (стилизация, кросс-жанровое сравнение); потенциале для интеграции в экспертные и образовательные системы, например, в системы проверки академической честности или программного обеспечения для литературной экспертизы.

Предлагаемый подход смещает фокус анализа на фонологический уровень, что потенциально снижает влияние тематики и повыша-

Таблица 1. Длины файлов со стихотворениями авторов после обработки

Поэт	Длина текста (количество символов)
А.А. Ахматова	116 544
А.А. Блок	575 446
В.Я. Брюсов	1 136 186
А.А. Фет	460 734
М.Ю. Лермонтов	268 373
В.В. Маяковский	300 536
А.С. Пушкин	602 558
М.И. Цветаева	640 336
Ф.И. Тютчев	221 394

ет устойчивость к стилизации. В работе метод апробируется на корпусе поэзии, но его архитектура допускает применение к текстам любого жанра.

### Звуковой профиль

Анализ фонетических характеристик в данной работе предполагает работу не с самими звуками, а с формальным представлением звуков в виде знаков транскрипции. На основе транскрипции, полученной из исходного текста, методами программной библиотеки будет строиться транскрипционный профиль [3]. Пусть  $U$  – множество всех используемых в работе знаков транскрипции. Транскрипционный профиль формируется не только по одиночным знакам, но и по непустым цепочкам знаков (строкам) и количеству их вхождений в рассматриваемую строку  $s$  символов из  $U$ . Через  $U^+$  обозначим множество непустых цепочек символов из  $U$ . Количество вхождений строки  $s'$  в строку  $s$  будем обозначать через  $Count(s', s)$ . Некоторые строки будут содержать в точности один символ. Т.е. вхождение символа в строку можно рассматривать как частный случай вхождения строки в строку. Пусть  $G$  – это непустое множество строк из  $U^+$ . Будем говорить, что множество  $G$  касается строки  $s$ , если хотя бы один элемент  $G$  входит в  $s$ . Для количества вхождений  $G$  в  $s$  будем использовать аналогичное обозначение  $Count(G, s)$ . Очевидно,  $Count(G, s) = \sum(x \in G) Count(x, s)$ . Пусть  $D \subseteq U^+ \cup (2^{U^+} \setminus \{\emptyset\})$ , т.е.,  $D$  содержит непустые

цепочки символов из  $U$  или непустые множества непустых цепочек символов из  $U$ . Пусть  $G \in D$ ,  $s \in U^+$ . Частотой вхождения  $G$  в  $s$  относительно домена  $D$  будем называть число:

$$Freq(G, s, D) = \frac{Count(G, s)}{\sum_{H \in D} Count(H, s)}$$

Транскрипционным профилем непустой строки  $s$  символов транскрипции из множества  $U$  относительно домена  $D \subseteq U^+ \cup (2^{U^+} \setminus \{\emptyset\})$  назовем отображение  $P_s: D \rightarrow [0, 1]$  такое, что для любого  $G \in D$   $P_s(G) = Freq(G, s, D)$ .

### Корпус

Для определения авторства текста необходимо иметь знания о звуковых профилях, характерных для разных авторов. Для этого нужен хотя бы один образец текста, автор которого уже известен. В этой статье в качестве авторов мы возьмем русских поэтов, а в качестве образцов текста – их сборники стихотворений.

Поэты, выбранные для базы авторов в этой статье, – А.С. Пушкин, А.А. Ахматова, А.А. Фет, В.Я. Брюсов, В.В. Маяковский, Ф.И. Тютчев, М.И. Цветаева, А.А. Блок. Для создания корпуса будут использованы сборники их стихотворений с сайта *RoyalLib.com* [4] – сайт предоставляет возможность скачать сборники стихотворений и поэм в *.txt* формате. Далее текстовые файлы очищаются от названий произведений, дат, примечаний и комментариев вручную. В результате у каждого автора будет

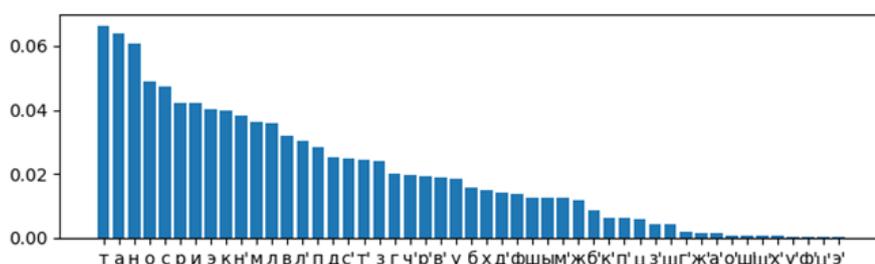


Рис. 1. Звуковой профиль для А.А. Блока

по одному текстовому файлу, который будет содержать только его стихотворения и никакой лишней информации, и составление звукового профиля по такому файлу позволит наиболее точно описать фонетические предпочтения поэтов. Получившиеся текстовые файлы и их длины представлены на табл. 1.

Помимо русских букв, в количество символов в правом столбце входят пробелы, знаки препинания и переходы на новую строку, каждый из которых считается за отдельный символ. Можно заметить, что у В.Я. Брюсова текстовый файл состоит из более миллиона символов, в то время как средняя длина текстов для составления звуковых профилей других авторов – около 400 тысяч символов. При этом важно сказать, что авторы с наибольшим количеством текста, на основе которого будет составлен звуковой профиль, не будут определяться алгоритмом определения авторства чаще, чем остальные авторы – для них лишь будут более точно определены характерные для их произведений фонетические признаки.

### Алгоритм составления звукового профиля

Для каждого автора проводится полная фонетическая транскрипция отобранных произведений с помощью системы автоматической фонетической транскрипции, разработанной авторами. Детальное описание алгоритма транскрипции, его архитектуры и валидации представлено в отдельной статье «Построение алгоритма фонетической транскрипции текста» (Фуркало, Аншаков), принятой к публикации в настоящем выпуске журнала [5]. В рамках данной работы используется конечный модуль транскриптора, преобразующий орфографический текст в последовательность фонем с учетом основных фонетических процессов русского

языка (редукция гласных, ассимиляция согласных по глухости/звонкости и пр.).

Звуковой профиль представляется в виде статистического вектора, отображающего нормализованные частоты встречаемости фонетических характеристик в тексте. На рис. 1 показан звуковой профиль, составленный по произведениям А.А. Блока.

### Метод определения автора

Аналогично такой же звуковой профиль создается и для спорного текста, для которого требуется установить авторство. Затем производится его сравнение с эталонными профилями известных авторов с использованием метрики косинусного сходства (*cosine similarity*).

Алгоритм работает по следующей схеме.

1. Для входного текста строится вектор звукового профиля  $V_{text}$ , где каждое измерение соответствует частоте конкретной фонемы.

2. Загружаются предварительно рассчитанные эталонные векторы  $\{V_{author1}, V_{author2}, \dots, V_{authorn}\}$ , хранящиеся в виде файлов *json*.

3. Для каждой пары векторов  $V_{text}$  и  $V_{authori}$  вычисляется косинусное сходство по формуле:

$$\text{similarity} = \frac{V_{text} \cdot V_{authori}}{\|V_{text}\| \|V_{authori}\|},$$

где  $V_{text} * V_{authori}$  – скалярное произведение векторов (сумма произведений соответствующих частот), а  $\|V\| = \sqrt{\sum v_j^2}$  – евклидова норма вектора (корень из суммы квадратов его частот).

4. Полученные коэффициенты сходства (в диапазоне от 0 до 1) интерпретируются как мера близости неизвестного текста к стилю каждого автора. Автору с максимальным значением коэффициента приписывается предполагаемое авторство.

Таблица 2. Результаты для «Дон Жуан» В.Я. Брюсова

Автор	Вероятность авторства
В.Я. Брюсов	95,35 %
А.А. Блок	95,15 %
А.С. Пушкин	95,10 %
М.Ю. Лермонтов	95,07 %
А.А. Фет	94,92 %
М.И. Цветаева	94,51 %
А.А. Ахматова	94,50 %
В.В. Маяковский	94,15 %
Ф.И. Тютчев	221 394

Таблица 3. Результаты экспериментов для первой половины авторов

Произведение	Предположение системы	Количество символов предложенного текста	Содержался ли «спорный» текст в корпусе
В.Я. Брюсов «Дон Жуан»	В.Я. Брюсов	484	Да
В.Я. Брюсов «Сумерки»	А.С. Пушкин	419	Нет
А.С. Пушкин «Медный всадник» (Вступление)	А.С. Пушкин	2,493	Нет
А.С. Пушкин «Руслан и Людмила»	А.С. Пушкин	13,785	Нет
В.В. Маяковский «Юбилейное»	В.В. Маяковский	4,779	Да
В.В. Маяковский «От усталости»	А.С. Пушкин	534	Да
А.А. Ахматова «Смятение»	А.А. Ахматова	725	Нет
А.А. Ахматова «Песенка»	А.С. Пушкин	335	Да
М.Ю. Лермонтов «Ангел»	М.Ю. Лермонтов	474	Да
М.Ю. Лермонтов «Пророк»	М.Ю. Лермонтов	768	Да

5. Результаты ранжируются по убыванию коэффициента сходства и представляются в виде табл. 2.

Проверим алгоритм на стихотворении «Дон Жуан» В.Я. Брюсова. Результаты представлены в табл. 2.

Система смогла успешно определить автора стихотворения. В столбце «Вероятность авторства» полученный ранее коэффициент сходства с автором (от 0 до 1) для большей наглядности переведен в проценты. Из таблицы видно, что

разрыв между вероятностями принадлежности текста разным авторам незначителен. Это можно объяснить тем, что многие фонемы неизбежно употребляются чаще остальных вне зависимости от автора [6], и если бы звуковые профили каждого автора были составлены на более объемных корпусах текста, разрыв мог бы быть менее значительным, так как это могло бы дать более полное представление о фонетических предпочтениях, характерных для автора.

Незначительный разрыв наблюдался и в

Таблица 4. Результаты экспериментов для второй половины авторов

Произведение	Предположение системы	Количество символов предложенного текста	Содержался ли «спорный» текст в корпусе
М.И. Цветаева «В пятнадцать лет»	А.А. Фет	472	Да
М.И. Цветаева «Книги в красном переплете»	М.И. Цветаева	972	Да
Ф.И. Тютчев « <i>Silentium!</i> »	Ф.И. Тютчев	489	Да
Ф.И. Тютчев «Весенняя гроза»	В.В. Маяковский	439	Да
А.А. Фет «Еще акация одна»	А.А. Блок	779	Да
А.А. Фет «На корабле»	А.А. Фет	388	Да
А.А. Блок «Фабрика»	А.А. Блок	430	Да
А.А. Блок «Осенняя воля»	А.А. Блок	891	Да

остальных проведенных экспериментах, при этом наиболее вероятный автор во многих случаях определялся правильно. Результаты определения авторства для стихотворений В.Я. Брюсова, А.С. Пушкина, В.В. Маяковского, А.А. Ахматовой и М.Ю. Лермонтова представлены в табл. 3.

Результаты атрибуции текстов М.И. Цветаевой, Ф.И. Тютчева, А.А. Фета и А.А. Блока представлены в табл. 4.

### Обзор результатов

Для каждого автора было отобрано два случайных стиха, и система правильно предположила автора в 12 случаях из 18. На основании этого можно сказать, что вероятность правильного определения автора – 67 %. Прослеживается тенденция, что для более длинных образцов текста, предложенных для атрибуции, алгоритм определяет автора правильно с большей вероятностью. При этом хочется отметить, что самый длинный образец «спорного» текста – отрывок из «Медного всадника» А.С. Пушкина – вовсе не состоял в его корпусе произведений, на основе которого был составлен звуковой профиль поэта. Следовательно, система действительно может определить автора не просто по вхождению текста в известные источники, а по звуковой схожести этого текста с известными источниками, даже если в них не содержалось искомого текста.

Система предположила авторство

А.С. Пушкина чаще, чем остальных авторов (5 раз из 18). Из этого можно сделать вывод о том, что фонетические характеристики произведений А.С. Пушкина наиболее распространены среди этих поэтов.

### Заключение

В данной статье был предложен и экспериментально проверен метод автоматической атрибуции текстов на основе анализа их звукового (фонетического) профиля. В основе метода лежит гипотеза о существовании устойчивого фонетического идиолекта – набора индивидуальных, часто неосознаваемых предпочтений автора в использовании определенных звуков речи, который слабо коррелирует с семантикой и жанром текста.

Основные результаты статьи заключаются в следующем.

1. Разработан и реализован полный алгоритм атрибуции, включающий этапы: автоматической фонетической транскрипции, построения звуковых профилей (векторов частотностей фонем) и их сравнения с помощью метрики косинусного сходства.

2. Создан корпус эталонных звуковых профилей для ряда русских поэтов 19–20 вв. (А.С. Пушкин, А.А. Ахматова, В.Я. Брюсов и др.), который может служить основой для дальнейших исследований.

3. Экспериментальная проверка на корпусе поэтических текстов показала, что метод

корректно определяет автора в 67 % случаев. Ключевым фактором, влияющим на точность атрибуции, является объем анализируемого текста.

Полученные результаты подтверждают основную гипотезу: фонетический уровень текста содержит статистически измеримую информацию об авторском стиле, которую можно использовать для атрибуции независимо от тематики произведения.

### Ограничения и перспективы

В рамках проведенных экспериментов, автор текста определялся из девяти возможных авторов. Если обогащать базу авторов до десятков или сотен, вероятность правильного определения автора может снизиться, так как теоретически больше авторов будут иметь схожие звуковые профили. Тем не менее этот метод

успешно выполнит атрибуцию текста при небольшом количестве возможных авторов.

Также текущая реализация требует для надежной атрибуции текстов значительного объема «спорного» текста, что ограничивает ее применение для коротких фрагментов. Перспективным направлением является оптимизация алгоритма для работы с малыми текстами.

Наибольший практический потенциал предложенный метод может раскрыть при использовании в составе ансамбля с традиционными стилометрическими подходами (лексическими, синтаксическими), что позволит повысить общую надежность систем автоматической атрибуции текстов. Это также предоставит дополнительные признаки характеристики стилей авторов, что поможет преодолеть проблему со схожестью звуковых профилей авторов при их большом количестве.

### Список литературы

1. Резанова, З.И. О выборе признаков текста, релевантных в автороведческой экспертной деятельности / З.И. Резанова, А.С. Романов, Р.В. Мещеряков // Вестник Томского государственного университета. Филология. – 2013. – № 6(26). – С. 38–52.
2. Невзглядова, Е.В. Звуковая организация и звуковая интерпретация стихотворной речи (Поэтический слух с филологической точки зрения) / Е.В. Невзглядова // Известия Российской академии наук. Серия литературы и языка. – 2003. – Т. 62. – № 3. – С. 24–37.
3. Quantitative Approaches to Versification / eds. P. Plecháč, B.P. Scherr, T. Skulacheva, H. Bermúdez-Sabel, R. Kolár. – Praha, 2019 [Electronic resource]. – Access mode : [https://serval.unil.ch/resource/serval:BIB\\_98B472A538FC.P001/REF](https://serval.unil.ch/resource/serval:BIB_98B472A538FC.P001/REF).
4. Veb-sayt RoyalLib.com: Elektronnaya biblioteka Royallib [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.royallib.com>.
5. Фуркало, И.В. Построение алгоритма фонетической транскрипции текста / И.В. Фуркало, О.М. Аншаков // Наука и бизнес: пути развития. – 2026. – № 1.
6. Гусева, С.И. Статистические характеристики русской речи и их использование при обучении русскому языку как иностранному / С.И. Гусева, А.Л. Есауленко, В.В. Сысоенко // Обучение иностранному языку студентов высших и средних общеобразовательных учреждений на современном этапе: сб. науч. ул. – 2014. – С. 63–70.

### References

1. Rezanova, Z.I. O vybore priznakov teksta, relevantnykh v avtorovedcheskoy ekspertnoy deyatel'nosti / Z.I. Rezanova, A.S. Romanov, R.V. Meshcheryakov // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Filologiya. – 2013. – № 6(26). – S. 38–52.
2. Nevzglyadova, Ye.V. Zvukovaya organizatsiya i zvukovaya interpretatsiya stikhotvornoy rechi (Poeticheskiy slukh s filologicheskoy tochki zreniya) / Ye.V. Nevzglyadova // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya literatury i yazyka. – 2003. – T. 62. – № 3. – S. 24–37.
5. Furkalo, I.V. Postroyeniye algoritma foneticheskoy transkripsii teksta / I.V. Furkalo, O.M. Anshakov // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2026. – № 1.
6. Guseva, S.I. Statisticheskiye kharakteristiki russkoy rechi i ikh ispol'zovaniye pri obuchenii russkomu yazyku kak inostrannomu / S.I. Guseva, A.L. Yesaulenko, V.V. Sysoyenko // Obucheniiye

inostrannomu yazyku studentov vysshikh i srednikh obshcheobrazovatel'nykh uchrezhdeniy na sovremennom etape: sb. nauch. ul. – 2014. – S. 63–70.

---

© И.В. Фуркало, О.М. Аншаков, 2026

УДК 004.934.2:81'342

И.В. ФУРКАЛО, О.М. АНШАКОВ

ФГАОУ ВО «Российский государственный гуманитарный университет», г. Москва

## ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА ФОНЕТИЧЕСКОЙ ТРАНСКРИПЦИИ ТЕКСТА

*Ключевые слова:* автоматическое определение ударений; вычислительная лингвистика; йотированные гласные; обработка поэтических текстов; позиционные изменения согласных; редукция гласных; русский язык; фонетическая транскрипция; *NLP*; *Python*.

*Аннотация.* В статье представлена система автоматической фонетической транскрипции русскоязычного текста, реализованная на языке программирования *Python*. Система решает комплекс взаимосвязанных задач обработки естественного языка, включая автоматическое определение ударных позиций с использованием морфологического анализа, редукцию безударных гласных согласно нормам современного русского литературного произношения, преобразование йотированных гласных, позиционное оглушение и озвончение согласных и смягчение согласных перед определенными гласными. В статье описываются архитектура системы, математические модели ключевых алгоритмов, приводится сравнительный анализ с существующими решениями. Проведенная верификация демонстрирует эффективность предложенного подхода для задач компьютерной лингвистики и цифровой гуманитаристики.

### Введение

Фонетическая транскрипция текста представляет собой сложный лингвистический процесс преобразования графической записи речи в последовательность фонетических символов, адекватно отражающих актуальное произношение. Значимость этой задачи многократно возрастает при работе с поэтическими текстами, где фонетическая составляющая играет не вспомогательную, а структурообразующую роль [1].

В области вычислительной лингвистики и обработки естественного языка (*NLP*) раз-

работан значительный арсенал инструментов для фонетического анализа, включая такие известные библиотеки, как *NLTK*, *spaCy*, *Stanford CoreNLP*, и специализированные системы типа *CMU Pronouncing Dictionary* для английского языка. Однако для русского языка аналогичные инструменты демонстрируют ограниченную функциональность. Существующие решения охватывают лишь отдельные аспекты транскрипции, что создает существенные трудности для разработчиков систем компьютерной генерации и анализа стихотворных текстов [2].

Хотя это обычно не выражается явно, специалисты по лингвистике текста предполагают, что стихотворный текст и даже шире – художественный текст – обычно воспринимается человеком как текст звучащий. Даже если имеет место так называемое «чтение про себя», читатель мысленно «озвучивает» текст. Для стихотворного текста это особенно характерно. Косвенным подтверждением особого внимания к звучанию стихотворного текста является наличие большого количества научных работ, посвященных именно звучанию текста. Одной из главных характеристик стихотворного текста является ритм, а ритм как раз и описывает некоторые особенности звучания текста. Также в контексте стихотворного текста изучаются такие явления, как аллитерация и ассонанс, которые, очевидно, также характеризуют именно звучащий текст.

Для изучения звучащего текста можно использовать непосредственную запись звука, то есть звуковые файлы, и в этом направлении сделаны значительные успехи. Современные программы для распознавания и синтеза речи демонстрируют впечатляющие возможности. Однако эти достижения обычно лежат за пределами области исследований лингвистики. Лингвистика воспринимает текст как последовательность некоторых неделимых элементов, наделенных набором фиксированных свойств. Такими элементами, например, являются звуки

Таблица 1. Сравнительный анализ инструментов

Инструмент	Проводит фонетический разбор	Работает для русскоязычных текстов	Проводит разбор текстов
<i>Russian Poetry Scansion Tool</i>	Нет (только определение ударений для метрического анализа)	Да	Да
<i>spaCy</i>	Нет (только морфологический анализ и лемматизация)	Да (требует <i>natasha-spacy</i> )	Да
<i>NLTK</i> с русскими модулями	Нет (только базовые <i>NLP</i> -операции)	Да	Да
<i>Stanford CoreNLP</i>	Нет (не включает фонетические модули)	Частично (есть русская модель, но ограниченная)	Да
Онлайн-сервисы по фонетическому разбору	Да (по словарю, без позиционных правил)	Да	Нет (только для одиночных слов)
Предлагаемая в данной работе система	Да, полная (ударения, редукция, йотирование, ассимиляция, смягчение)	Да	Да

и фонемы, причем звук в этом контексте понимается обобщенно. Не интересен ни тембр, ни высота звука (за исключением случая тональных языков), ни способы разбиения звукового потока на отдельные звуки и фонемы – считается, что это разбиение уже сделано.

Для исследования обобщенных характеристик звучащего текста хорошо подходит такое представление, как транскрипция. Задача построения транскрипции текста не является тривиальной, так как формы записи текстов для естественных языков почти никогда не являются фонетическими (один символ – один звук), и правила построения транскрипции иногда достаточно сложны, содержат исключения, требуют применения вспомогательных процедур, например, расстановки ударений.

Научная значимость работы заключается в разработке формальных моделей фонетических процессов русской поэтической речи и их имплементации в виде вычислительных алгоритмов. Предложенные модели могут служить основой для дальнейших исследований в области *computational linguistics* и *digital humanities*.

Практическая значимость определяется широким спектром возможных применений системы в образовании, издательской деятельности, разработке речевых технологий и создании цифровых гуманитарных ресурсов.

### Обзор существующих решений

В области обработки естественного языка разработан ряд мощных библиотек и инструментов. Среди наиболее известных – *Natural Language Toolkit (NLTK)*, который предоставляет комплексные инструменты для токенизации, стемминга, лемматизации и других базовых задач *NLP* [3]. Однако *NLTK* не включает готовых решений для фонетической транскрипции русского языка.

Библиотека *spaCy* обеспечивает эффективный морфологический анализ и тегирование частей речи, что является важным компонентом системы определения ударений. В предлагаемой системе *spaCy* используется для первичной обработки текста и получения морфологических характеристик слов, необходимых для точного определения ударных позиций. Тем не менее *spaCy* сама по себе не решает задач собственно фонетической транскрипции.

*Stanford CoreNLP* предоставляет более широкий набор лингвистических инструментов, включая парсинг и анализ тональности, но ее возможности в области русской фонетики остаются ограниченными.

Для задач, специфичных для поэзии, в последнее время появляются специализированные инструменты, такие как *Russian Poetry Scansion*

*Tool (RPST)*, который предназначен для анализа метра и рифмы в русских стихотворных текстах. *RPST* решает задачу автоматического определения метра и размещения ударений с учетом поэтического контекста. Однако этот инструмент не предоставляет полной фонетической транскрипции.

Помимо этого, популярные онлайн-решения в интернете по фонетической транскрипции предлагают анализ отдельных слов, но не текстов [4–6].

В табл. 1 представлен сравнительный анализ существующих решений, который показывает, что, хотя имеются инструменты для отдельных аспектов обработки русскоязычного текста, комплексная система фонетической транскрипции до настоящего времени отсутствовала. Предлагаемая система призвана заполнить эту нишу.

### Архитектура предлагаемой системы

Разработанная система представляет собой последовательный конвейер фонетических преобразований, состоящий из взаимосвязанных модулей. Архитектура системы построена по принципу последовательного применения правил, где выход каждого модуля служит входом для следующего. Это обеспечивает модульность системы и возможность независимого совершенствования отдельных компонентов.

Основной конвейер обработки включает следующие этапы: акцентуация текста; редукция безударных гласных; обработка специфических окончаний; смягчение согласных; преобразование йотированных гласных; оглушение и озвончение согласных; удаление твердого знака; упрощение транскрипции (опционально).

Функция *transcribe* (*s*: *str*, *simplify*: *bool*, *verbose*: *bool*) запускает конвейер обработки. Она принимает параметры:

- *s* – текст, для которого необходимо получить транскрипцию;
- *simplify* – включение режима упрощенной транскрипции (в транскрипции будут только согласные и ударные гласные, по умолчанию *False*);
- *verbose* – вывод промежуточных результатов в терминал (по умолчанию *False*).

Весь процесс транскрипции может быть представлен как композиция операторов:

$$T(s) = U \circ H \circ D \circ J \circ S \circ E \circ R \circ A(s),$$

где *A* – акцентуация; *R* – редукция гласных; *E* – обработка окончаний -ого/-его и -тся/-ся; *S* – смягчение согласных; *J* – преобразование йотированных гласных; *D* – оглушение/озвончение; *H* – удаление твердого знака и *U* – упрощение транскрипции.

### Модуль акцентуации

Функция *accentuate*(*s*) решает задачу автоматического определения ударных позиций и их фиксации в тексте. Модуль использует результаты статьи «Расставляем ударения с помощью *Natasha* и *Spacy*» [7]. В них представлены готовые для использования словари с ударениями и исходный код, который был модифицирован под нужды этой работы. Представленные в статье словари ударений взяты из предварительно парсированного Вики-словаря (*Wiktionary*) [8], доступного на портале *Kaikki* [9], и из электронной версии словаря Зализняка [10].

Так, модуль акцентуации проводит морфологический анализ на основе русскоязычной реализации *spaCy* (*natasha-spacy*), а также лемм и словоформ, полученных в результате парсинга *Wiktionary* и словаря Зализняка.

Алгоритм работы включает токенизацию текста, морфологический анализ каждой словоформы и поиск в словаре акцентуированных вариантов. Результатом работы модуля является измененная строка, в которой проставлен символ ударения «'» перед каждой ударной гласной. В словах с одной гласной знак ударения добавляется перед единственной гласной в слове.

Пример: “У лукоморья дуб зеленый” → “‘у луком’орья д’уб зел’еный”.

### Модуль редукции гласных

Функция *vowel\_reduction*(*s*) реализует правила редукции безударных гласных в русском языке [11]. Модуль выполняет редукцию безударного “о” в [а], и редукцию безударных “е” и “я” в [и].

Пример: пустяк`и → пустик`и.

Преобразования применяются к строке, полученной из модуля акцентуации, поэтому у модуля редукции гласных уже есть информация об ударениях в тексте, и он мо-

жет применить изменения только к безударным гласным.

### Модуль обработки окончаний

Этот модуль реализован функцией *word\_ending(s)*. Она содержит в себе последовательную работу двух функций:

– *tsya(s)* – замена окончаний -ться/-тся на 'ца' в соответствии с разговорной нормой произношения;

– *ego(s)* – замена окончаний -ого/-его на -ава/-ива, отражающая фонетическую редукцию в быстрой речи [12].

Пример: д`оброго → д`обрава, стар`аться → стар`аца.

### Модуль смягчения согласных

Этот модуль реализован функцией *soften(s)*, которая в себе объединяет две функции для двух типов смягчения:

– *soften\_vowels(s)* – смягчение согласных перед гласными я, е, ю, е, и, ь;

– *soften\_consonants(s)* – дополнительное смягчение в сочетаниях согласных.

Модуль использует словарь смягчений для определения соответствий между гласными и их смягченными вариантами: «я» заменяется на [a], «ю» – на [y], «е» на [э], «и» – на [и]. Если это ударные гласные, то к ним добавляется знак ударения. Так, «а» заменится на [a], «ю» на [y] и так далее. Буква «е» в эту функцию приходит уже с проставленным знаком ударения перед ней, поэтому она всегда будет заменена на звук [o]. При этом мягкий знак заменяется на ['].

### Модуль йотированных гласных

Функция *jot(s)* реализует преобразование йотированных гласных с использованием словаря йотирования: уква «е» заменяется на [й'o], буква «е» – на [й'э], «я» – на [й'a], «ю» – на [й'y]. Если перед ними стоит апостроф (знак смягчения), то к результату добавляется ' в начале: «'е» → [й'o], «'е» → [й'э] и так далее. Для ударных вариантов (отмечены символом ) правила меняются: «е» → [o], «е» → [э], «ю» → [y], а вот «я» становится [й'a]. Комбинации с обоими знаками («'е», «'е», «'ю») теряют й' и превращаются в [o], [э], [y] соответственно, а «'я» – в [й'a]. Алгоритм учитывает позицию гласной в

слове и предшествующие звуки.

### Модуль позиционных изменений согласных

Функция *deafen\_and\_sharpen(s)* реализует комплекс правил оглушения и озвончения согласных в различных позиционных контекстах:

– оглушение в конце слова;

– оглушение перед глухими согласными;

– озвончение перед звонкими согласными;

– обработка специфических сочетаний.

Функция заменяет согласные звуки в русском тексте по правилам фонетического уподобления:

Оглушение: б → п (губ → гуп), г → к (луг → лук), в → ф (ров → роф), д → т (город → горот), з → с (мороз → морос), ж → ш (нож → нош).

Озвончение: к → г (вокзал → вогзал), т → д (молотьба → молодьба), с → з (сбор → збор), ш → ж, ф → в, п → б.

А также: гк → хк в любом положении (легко → лехко), в + глухой → ф (в парке → ф парке), с + звонкий → з (с дороги → з дороги).

### Удаление твердого знака

Последним шагом при работе функции транскрипции по умолчанию является удаление твердого знака из результирующей строки, полученной из работы всех предыдущих модулей. За это отвечает функция *remove\_hard\_sign(s)*.

### Модуль упрощения транскрипции (опционален)

Если функция транскрипции была запущена с параметром *simplify = True*, последним шагом транскрипции после удаления твердого знака будет упрощение транскрипции, за которую отвечает функция *simplify\_transcription(s)*. Она удаляет из строки транскрипции все, кроме согласных звуков и ударных гласных. Соответственно, она также удаляет знаки ударения из транскрипции, так как единственные оставшиеся в ней гласные – ударные.

Пример: п'ит`омцы → п'томц.

### Верификация

Проверим работу алгоритма на фразе «и днем, и ночью кот ученый все ходит по цепи

кругом». Полученный текст с помощью функции *transcribe*:

[`и д`н`ом `и н`оч`й`у к`от уч`оный фс`и х`од`ит п`о ц`эп`и круг`ом].

Можно заметить, что слово «все» превратилось в «фс`и» – это связано с тем, что в исходном тексте в слове «все» не было буквы «е», и оно было написано как «все». Словарь ударений получает информацию об одном слове за раз, и у него нет контекста предложения для разрешения омонимии. Поэтому важно не пренебрегать буквой «е» в тексте, для которого необходимо получить транскрипцию. Также для слова «цепи» было использовано наиболее распространенное ударение на букву «е» – це́пи. Причина такая же, как и у проблемы со словом «все» – отсутствие контекста.

Транскрипция текста с исправленным словом «все»:

[`и д`н`ом `и н`оч`й`у к`от уч`оный фс`о х`од`ит п`о ц`эп`и круг`ом].

Как мы видим, для слова «все» в этот раз была составлена корректная транскрипция. Для остальных слов транскрипция была составлена правильно.

Возьмем другой отрывок – «у лукоморья дуб зеленый, золотая цепь на дубе том».

Полученная транскрипция:

[`у лукамар`и дуп з`ил`оный злат`ай`а ц`эп`и н`а д`уб`и т`ом].

Заметно, что слово «лукоморья» стало «лукамар`и», что не является ожидаемым результатом. Это связано с другой проблемой словаря ударений – в нем вообще отсутствует слово «лукоморье», поэтому на этапе расставления ударений оно осталось без ударения. Соответственно, все гласные посчитались за безударные и были редуцированы в соответствии с правилами редукции гласных. Тем не менее остальной текст получил ожидаемую фонетическую транскрипцию.

### Ограничения и перспективы

В текущей реализации словарь ударений (*natasha-spacy*) не учитывает контекст фразы, в котором находятся слова, и не способен решить

конфликт омонимии: когда несколько слов пишутся одинаково, но имеют разный смысл, и их ударения тоже отличаются. Для омонимичных слов предполагается наиболее распространенный вариант, и из-за этого фонетическая транскрипция может отличаться от ожидаемой. Более того, словарь ударений в целом может не иметь некоторых слов. Также система может составить некорректную транскрипцию, если она столкнется с нестандартными ударениями в поэтических текстах, или окказионализмами, неологизмами или придуманными словами, а также составными словами, например, “антигравитационное” (в связи, опять же, с тем, что этого слова нет в используемом словаре ударений).

Тем не менее подход в этой работе позволяет алгоритмически точно преобразовать орфографический текст в запись, максимально приближенную к реальному произношению.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: выявление метра для поэтических текстов; разработка алгоритмов обработки омонимии и многовариантности ударений на основе машинного обучения; определение слов или текстов, для которых фонетическая транскрипция составляется некорректно (например, составные слова) и обработка этих и других пограничных случаев; создание адаптивных моделей, учитывающих индивидуальные авторские стили и историческую эволюцию произносительных норм; интеграция с системами анализа метра и рифмы для создания комплексного инструмента анализа поэтических текстов.

### Заключение

В статье представлена разработанная система фонетической транскрипции русскоязычных поэтических текстов, реализованная на языке *Python*. Ключевые достижения исследования следующие.

1. Разработан комплексный конвейер фонетической обработки русскоязычного текста, объединяющий модули акцентуации, редукции гласных, преобразования йотированных гласных, позиционных изменений согласных и обработки окончаний.

2. Реализованы алгоритм редукции безударных гласных и система контекстно-зависимых преобразований, адекватно отражающие

фонетические процессы русского языка.

3. Система реализована в качестве модуля-библиотеки *Python*, что позволяет другим исследователям и разработчикам использовать ее для решения своих задач.

Представленная система открывает новые возможности для автоматизированного анализа русскоязычного прозаического и поэтического

текста и может стать полезным инструментом для исследователей в области вычислительной лингвистики и цифровой гуманитаристики. Дальнейшее развитие системы предполагает тесное сотрудничество лингвистов-теоретиков, специалистов по компьютерной обработке текста и представителей цифровых гуманитарных наук.

### Список литературы/References

1. Yakovenko O. et al. Algorithms for automatic accentuation and transcription of Russian texts in speech recognition systems // International Conference on Speech and Computer. – Cham: Springer International Publishing, 2018. – P. 768–777.
2. Evdokimova V., Skrelin P., Chukaeva T. Automatic phonetic transcription for Russian: Speech variability modeling // International Conference on Speech and Computer. – Cham : Springer International Publishing, 2017. – P. 192–199.
3. Bird S., Klein E., Loper E. Natural Language Processing with Python. O'Reilly Media, 2009.
4. Fonetika.su [Electronic resource]. – Access mode : <https://fonetika.su>.
5. Phoneticonline.ru [Electronic resource]. – Access mode : <https://phoneticonline.ru>.
6. Sinonim.org [Electronic resource]. – Access mode : <https://sinonim.org>.
7. einhorn. Stressing with Natasha and Spacy [Electronic resource]. – Access mode : <https://habr.com/ru/post/575100>.
8. Wiktionary [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.wiktionary.org>.
9. Kaikki. Russian machine-readable dictionary [Electronic resource]. – Access mode : <https://kaikki.org/dictionary/Russian/index.html>.
10. Zaliznyak, A.A. Grammaticheskii slovar' russkogo yazyka [Electronic resource]. – Access mode : <https://gramdict.ru>.
11. Bondarko, L.V. Fonetika sovremennogo russkogo yazyka [Phonetics of the Modern Russian Language]. Saint Petersburg: Izd-vo S.-Peterburgskogo universiteta, 1998.
12. Kodzasov S.V., Krivnova O.F. Obshchaya fonetika [General Phonetics]. – Moscow: RGGU, 2001.

---

© И.В. Фуркало, О.М. Аншаков, 2026

УДК 514.182.2

Е.И. ИГНАТОВА, И.С. ФРОЛОВ, Ф.В. СВОЙКИН  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской  
технический университет», г. Санкт-Петербург

## АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ШЕСТИУГОЛЬНОЙ УСЕЧЕННОЙ ПИРАМИДЫ СРЕДСТВАМИ КОМПАС 3D V23

*Ключевые слова:* аксонометрия; ГОСТ; ЕСКД; инженерная графика; КОМПАС-3D; методика преподавания; начертательная геометрия; ортогональные проекции; развертка поверхности; усеченная пирамида.

*Аннотация.* В статье представлена детальная методика выполнения графической работы по построению шестиугольной усеченной пирамиды в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D V23. Рассмотрена полная последовательность действий: от подготовки формата А3 с оформлением по ГОСТ 2.304-68 и 2.104-68 до построения комплекса ортогональных проекций (горизонтальной, фронтальной, профильной), определения натуральной величины сечения методом замены плоскостей проекций, построения аксонометрической проекции (изометрии) и разработки развертки поверхности. Особое внимание уделено правилам простановки размеров, выбора типа и толщины линий, а также логике проекционной связи между видами. Методика ориентирована на студентов технических специальностей и направлена на формирование практических навыков работы в системе автоматизированного проектирования (САПР), углубление знаний в области начертательной геометрии и развитие пространственного мышления в рамках учебного курса инженерной графики.

священ ряд работ [1–6]. Для выразительности и наглядности чертеж выполняют различными линиями, которые для всех отраслей промышленности и строительства устанавливает ГОСТ 2.303-68 [8]. В учебном процессе технических вузов формирование навыков пространственного мышления и владения современными системами автоматизированного проектирования является важной составляющей подготовки инженеров. Особое значение имеет умение грамотно выполнять и оформлять комплексные чертежи, включая построение ортогональных проекций, аксонометрических изображений и разверток геометрических тел, в строгом соответствии с требованиями Единой системы конструкторской документации (ЕСКД). Данная статья представляет собой детальное пошаговое руководство по построению чертежа шестиугольной усеченной пирамиды в среде КОМПАС-3D V23, которое нацелено на закрепление у студентов практических компетенций в области инженерной графики.

### Цель

Целью данной статьи является пошаговое построение графической работы для формирования практических умений оформления чертежей, а также развития пространственного мышления у студентов технических специальностей.

### Материалы и методы

Ниже приводится последовательность выполнения задания.

1. Подготовить формат А3 (форматная рамка, основанная надпись).
2. Начертить согласно размерам, представленным на рис. 1, поля для расположения

### Введение

Методике построения схем в системе «КОМПАС-3D» при подготовке специалистов для технических специальностей по начертательной геометрии и инженерной графике по-



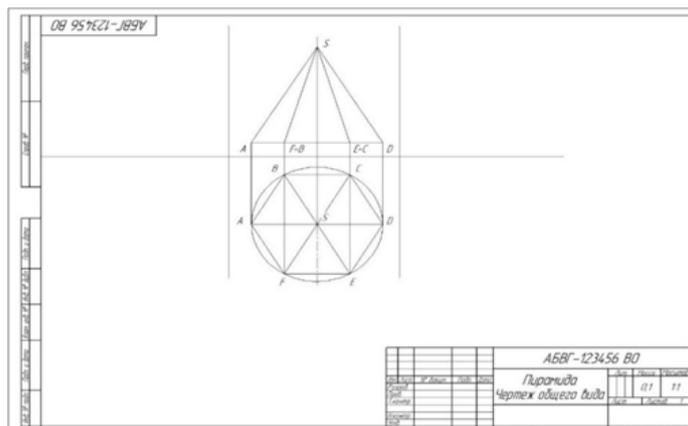


Рис. 3. Пирамида горизонтальный и фронтальный виды

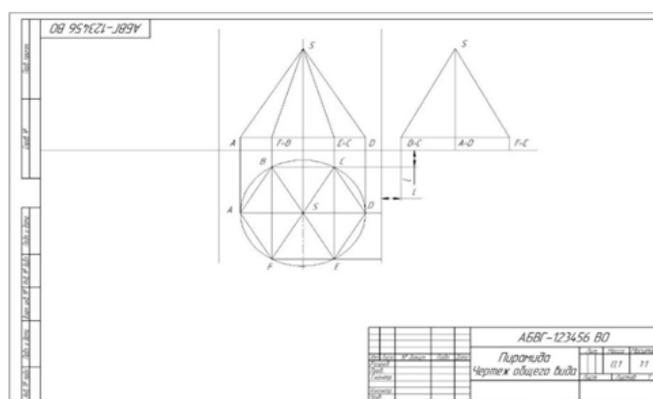


Рис. 4. Пирамида, профильный вид

писи; в графе 13 – даты подписания документов; в графе 26 – обозначение документа; в графе 32 – обозначение формата листа. Примечание: для формата А4 основная надпись располагается только по короткой стороне листа.

На чертеже выполняется рамка, а также проставляются необходимые отступы для нанесения детали на чертеж. Выполним чертеж, последовательно нанося друг за другом виды, начнем с горизонтального вида. Проставим необходимые отступы и построим осевые линии, которые помогут разграничить наш чертеж на зоны, каждой зоне будет соответствовать свое задание, пример по отступам и размерам изображен на рис. 2.

Построим окружность диаметром 70 мм так, как указано на рис. 2, окружность строится основной линией, но изначально чертеж до проверки преподавателем должен выполняться весь в тонких линиях для того, чтобы можно

было аккуратно исправить все неточности. После построения окружности необходимо нанести осевые линии на чертеж. Осевые линии выполняются штрихпунктирной линией. Впишем шестиугольник в пирамиду, для этого берем циркуль и ставим ножку циркуля на пересечение горизонтальной осевой линии и окружности, а на другой стороне чертим две засечки на окружности, аналогичным образом делаем с другой стороны. Таким образом обозначим шесть точек, соединив которые получаем шестиугольник, вписанный в окружность. Запомним простые правила построения: если появляются точки пересечения геометрических фигур, обязательно нужно нанести обозначения этих точек буквами латинского алфавита на чертеже, также обозначим вершину и проведем от вершины к ранее обозначенным точкам ребра.

Проведем линию связи от точек основания шестиугольной пирамиды до фронтального

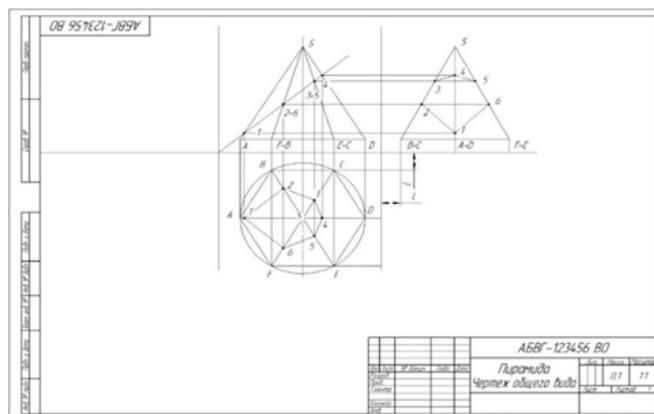


Рис. 5. Обозначение точек секущей плоскости К

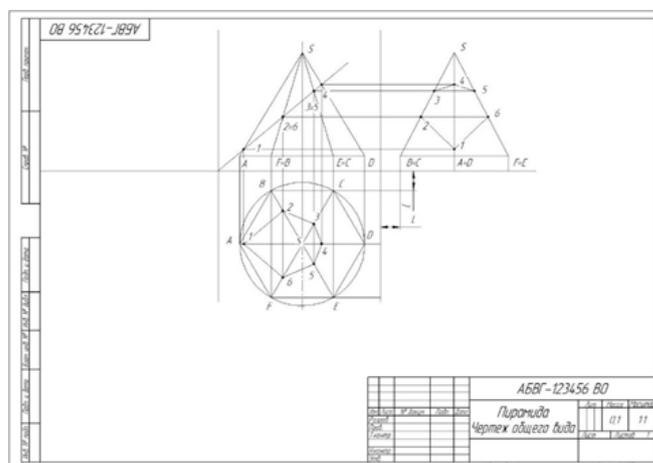


Рис. 6. Горизонтальная и профильная проекция усеченной пирамиды

вида. Определимся, что наша пирамида не лежит на горизонтальной плоскости, а парит над ней на высоте 30 мм. Высота нашей пирамиды 70 мм, пример изображен на рис. 3.

Линии связи должны проходить параллельно осевым линиям на чертеже. Таким образом, наши проекции будут соосны. Отмерим необходимые расстояния и перенесем линии связи с горизонтальной плоскости на профильную плоскость, на пересечении линий связи от горизонтальной проекции и фронтальной проекции построится профильная проекция нашей пирамиды (рис. 4). Расстояния от начала координат до точки пересечения линии связи и осевой удобно переносить циркулем, для этого обязательно проводить дугу, достаточно отмерить расстояние и поставить засечку на оси.

Усечем пирамиду секущей плоскости. Представим, что часть пирамиды срезается, на

месте среза появятся новые точки пересечения линий связи и новой секущей плоскости, секущую плоскость обозначим буквой К. Секущая плоскость начинается от пересечения осевых линий и идет приблизительно под 40°, секущую плоскость проводит преподаватель таким образом, чтобы у всех учащихся линия была немного разной. Следовательно, чертеж аксонометрии, истинная величина и развертка будут у всех разными.

Перенесем по линиям связи проекции точек 1, 2, 3, 4, 5, 6 на профильную и горизонтальную плоскости, внимательно опустим каждую точку на свое ребро, получим горизонтальную и профильную проекции среза (рис. 6).

Нанесем линии среза, а также основные линии фигуры толщиной основной линии, которая равна  $S$  (1 мм), наносить линии можно только после проверки работы преподавателем (рис. 7).

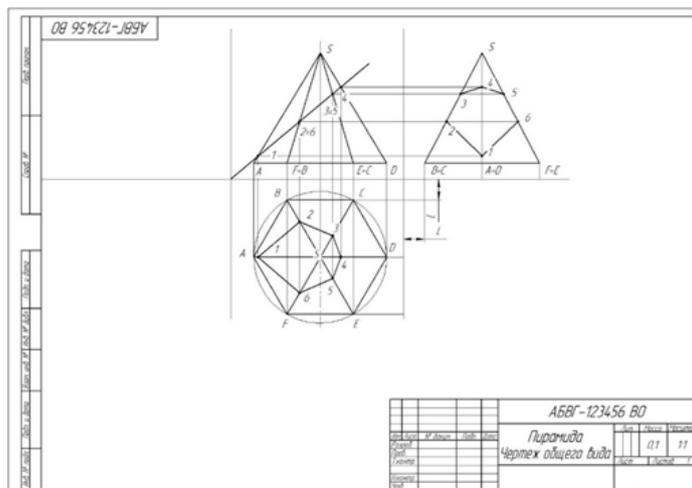


Рис. 7. Усеченная пирамида

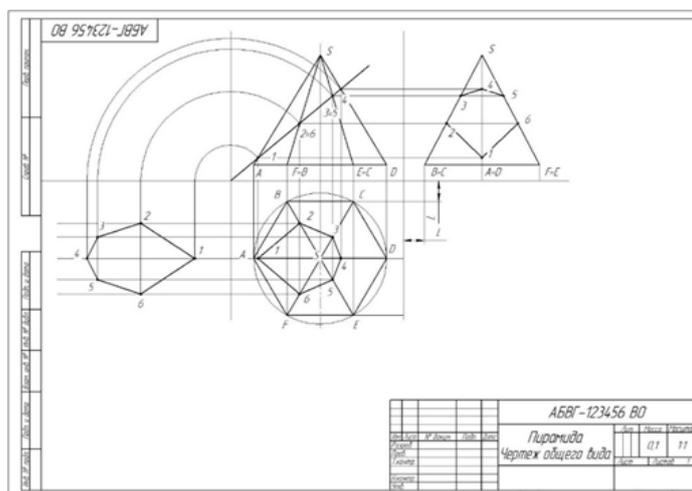


Рис. 8. Истинная величина среза усеченного шестиугольника

На фронтальной, горизонтальной и профильной проекциях располагаются проекции усеченной пирамиды, определим истинную величину среза фигуры. Воспользуемся методом замены плоскостей проекции, будем заменять фронтальную плоскость. Поставим ножку циркуля в пересечение осевых линий, откуда начинается секущая плоскость  $K$ . Установим грифель циркуля в каждую точку последовательно и проведем дугу до пересечения с осевой. Проведем от горизонтальной проекции точек среза линию связи до пересечения в новой плоскости, новые точки пересечения образуют истинную величину (рис. 8).

Построим аксонометрию шестиугольной пирамиды  $ABCDEF S$ . Для этого нужно опре-

делиться, что аксонометрия должна строиться по осевым линиям, которые располагаются под  $30^\circ$  или через соотношение 5 к 3, что легче запомнить. Отступим 35 мм снизу и 80 мм слева, поставим точку, через которую будет проходить центр осевых линий рисунка. Осевые линии также строим тонкими, чтобы впоследствии можно было их не стирать, но при этом они не мешали компоновки чертежа и не выделялись на фоне детали.

Представим, что наши осевые линии накладываются на горизонтальную проекцию таким образом, что пересечение осевых линий – это вершина  $S$ , а осевая  $X$  совпадает с ребрами  $AS$  и  $SD$ . Отмерим отрезки  $AS$  и  $SD$  и отложим их от центра осевых линий вдоль оси абсцисс ( $X$ ).

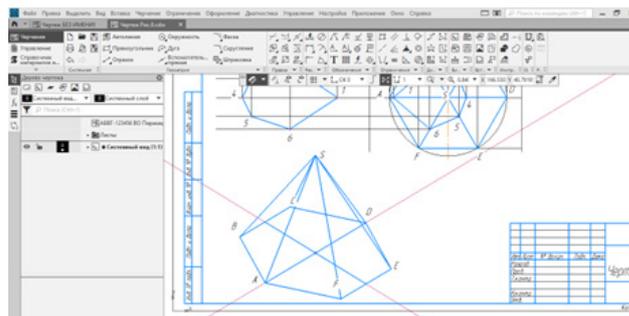


Рис. 9. Аксонометрия шестиугольной пирамиды

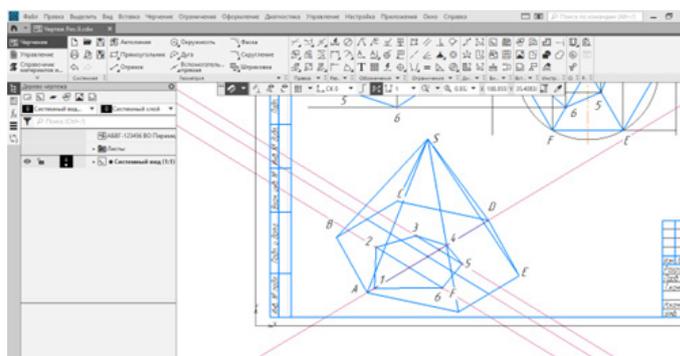


Рис. 10. Основание сечения на аксонометрической проекции

Запомним главное правило построения аксонометрии: можно переносить либо те линии, которые накладываются на оси, либо те, которые параллельны осям; линии, которые проходят под углом, переносить нельзя. Для того чтобы перенести отрезки  $AB$ ,  $CD$ ,  $DE$  и  $FA$ , нужно найти точки начала и точки окончания наших отрезков. Разделим  $BC$  и  $FE$  пополам, проведем посередине вертикальную линию, вертикальная линия совпадает и осью ординат ( $Y$ ) и проходит через начало координат, перенесем ее. А получившиеся точки уже соединим, получим основание шестиугольной пирамиды. Из центра  $S$  проведем параллельно оси ординат ( $Y$ ) линию от центра  $O$  до вершины  $S$  и обозначим буквами получившиеся ребра.

Получив вершину и ребра, можно соединить все линии к вершине, получаем аксонометрию шестиугольной пирамиды (рис. 9).

Аксонометрическая проекция может быть представлена как сечением, так и без сечения, дополним аксонометрическую проекцию сечением, для этого перенесем горизонтальную проекцию среза по правилам переноса на аксонометрическую плоскость (аналогично тому,

как переносили параллельные линии осей, а линии, которые идут под углом, соединяли по двум точкам). Проекция сечения имеет отрезок которая совпадает с осевой  $X$ , это отрезок 1–4. Отталкиваясь от центра  $S$ , переносим, замеряя циркулем расстояние от центра до точки 1 и от центра до точки 4. Линии связи на сечении располагаются параллельно осям, по ним перенесем расстояния от отрезка 1–4, до точек 2, 3, 5, 6 и перенесем их, поэтапно отмеряя каждый циркулем, соединим получившиеся точки и получим основание сечения (рис. 10).

Соединим последовательно точки со своими ребрами, точку 1 – с ребром  $AS$ , точку 2 – с ребром  $BS$  и так далее, получим аксонометрию усеченной пирамиды.

Удалим все дополнительные линии, которые были нужны в построении аксонометрии и увидим, как будет выглядеть усеченная аксонометрия.

Развертка шестигранной пирамиды будет выполняться сразу в двух вариантах – усеченной и неусеченной. В правом нижнем углу отступим от рамки влево 10 мм и от основной надписи вверх 25 мм, далее отмеряем на фрон-

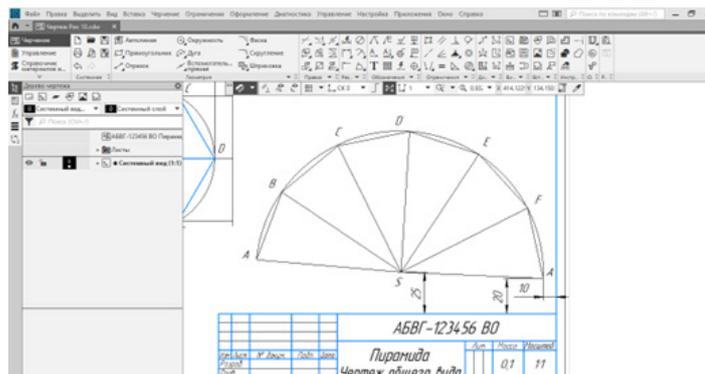


Рис. 11. Развертка шестиугольной пирамиды с отступами

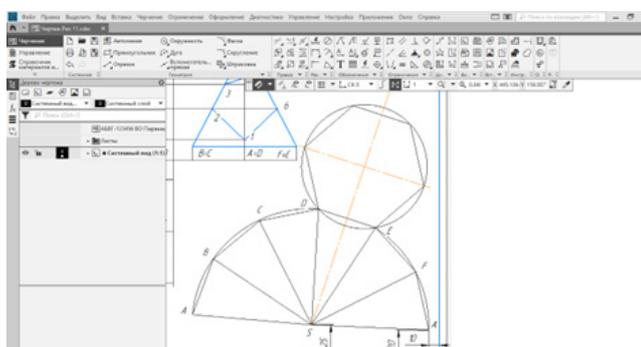


Рис. 12. Основание развертки шестигранной пирамиды

тальном виде от точки  $A$  до точки  $S$  расстояние по ребру и нанесем их на чертеж циркулем, этим радиусом проведем дугу.

Отмерим расстояние равное ребру, это отрезок  $AB$ , отложим его на дуге. Из центра  $S$  проведем линию по получившимся вершинам ребра и отметим буквами, как показано на рис. 11.

Проведем биссектрису отрезков  $SD$  и  $SE$  штрихпунктирной линией, линия должна выходить за поле дуги на расстояние диаметра окружности основания пирамиды. От ребра  $ED$  по биссектрисе отложим расстояние, равное расстоянию от ребра до центра горизонтальной проекции основания окружности, ребро  $DE$  является отправной точкой, проведем две параллельных вспомогательных линии, они параллельны биссектрисе. Соединим точки и получим основание шестигранной пирамиды (рис. 12).

### Выводы и рекомендации

Представленная в статье методическая по-

следовательность построения шестиугольной усеченной пирамиды в КОМПАС-3D V23 позволяет системно сформировать у студентов ключевые умения: от создания шаблона формата с основной надписью по ГОСТ до выполнения сложных графических операций, таких как построение трех видов, определение натуральной величины сечения методом замены плоскостей проекций, создание аксонометрической проекции и развертки поверхности. Реализация всех этапов работы в единой цифровой среде КОМПАС-3D способствует не только освоению инструментов системы, но и глубокому пониманию логики проекционной связи и метрических зависимостей между элементами чертежа.

Для повышения эффективности учебного процесса рекомендуется, чтобы преподаватель на этапе задания текущей плоскости варьировал ее положение для каждого студента. Это исключит механическое копирование и потребует осознанного применения методов начертательной геометрии при построении усеченной фигуры, определения истинной величины сечения и разработки индивидуальной развертки. Подоб-

ный дифференцированный подход стимулирует развитие аналитического и пространственного мышления, что критически важно для будущей инженерной деятельности.

## Заключение

Таким образом, разработанное пошаговое руководство служит эффективным учебно-

методическим инструментом для освоения студентами принципов выполнения комплексных чертежей в современной САПР. Последовательное выполнение всех пунктов задания закрепляет знания ГОСТов, навыки работы в КОМПАС-3D и фундаментальные понятия начертательной геометрии, формируя комплексную графическую культуру, необходимую инженеру и специалисту в высокотехнологичных отраслях.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## Список литературы

1. Козлов, В.А. Построение эвольвентного профиля зубчатого колеса в КОМПАС-3D V20 / В.А. Козлов, А.В. Варламова // Вестник Димитровградского инженерно-технологического института. – 2023. – № 1(29). – С. 43–51.
2. Шпренгер, Р.В. Использование системы трехмерного моделирования КОМПАС-3D при построении простых и сложных моделей / Р.В. Шпренгер, Д.В. Дьяконов // Информационные технологии в науке и производстве : материалы молодежной науч.-техн. конф. – 2014. – С. 143–146.
3. Тишина, А.О. Построение элементарных фигур вращения с использованием программы КОМПАС 3D / А.О. Тишина, Т.Л. Гольцева // Технологии аддитивного производства. – 2025. – Т. 3. – № 2. – С. 34–39.
4. Царук, Е.И. Особенности построения 2D-чертежа вала-шестерни на основе его 3D-модели в КОМПАС / Е.И. Царук, В.С. Евдокимова // Инновационные технологии в инженерной графике: проблемы и перспективы : сборник трудов Международ. науч.-практ. конф. – 2023. – С. 253–257.
5. Туркеничева, Л.А. Построение разверток в системе КОМПАС-3D / Л.А. Туркеничева, О.А. Туркеничева // Инновационные технологии в строительстве и управление техническим состоянием инфраструктуры : сборник научных трудов VI Всерос. нац. науч.-практ. конф., Ростов-на-Дону, 2024. – 2024. – С. 111–114.
6. Дербенева, О.Л. Пересечение поверхностей – методика построений в КОМПАС-3D / О.Л. Дербенева // Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом вузе: традиции и инновации. – 2019. – Т. 1. – С. 233–235.
7. Долгова, А.В. Автоматизированное построение ортогональных проекций плоскости общего положения в САПР КОМПАС-3D / А.В. Долгова, С.В. Заборовских // Наука XXI века: вызовы, становление, развитие : сборник статей XXIII Междунар. науч.-практ. конф., Петрозаводск, 2025. – 2025. – С. 391–396.
8. ГОСТ 2.303–68. Единая система конструкторской документации. Линии. – М. : Стандартинформ, 2007. – 9 с.
9. ГОСТ Р 2.104–2023. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Основные надписи. – М. : Стандартинформ, 2024. – 8 с.
10. ГОСТ Р 2.201–2023. Единая система конструкторской документации. Обозначение изделий и конструкторских документов. – М. : Стандартинформ, 2024. – 16 с.
11. ГОСТ 2.302–68. Масштабы. – М. : Стандартинформ, 2007. – 4 с.

## References

1. Kozlov, V.A. Postroyeniye evol'ventnogo profilya zubchatogo koleasa v KOMPAS-3D V20 / V.A. Kozlov, A.V. Varlamova // Vestnik Dimitrovgradskogo inzhenerno-tekhnologicheskogo instituta. – 2023. – № 1(29). – S. 43–51.
2. Shprenger, R.V. Ispol'zovaniye sistemy trekhmernogo modelirovaniya KOMPAS-3D pri postroyenii prostykh i slozhnykh modeley / R.V. Shprenger, D.V. D'yakonov // Informatsionnyye tekhnologii v nauke i proizvodstve : materialy molodezhnoy nauch.-tekhn. konf. – 2014. – S. 143–146.

3. Tishina, A.O. Postroyeniye elementarnykh figur vrashcheniya s ispol'zovaniyem programmy KOMPAS 3D / A.O. Tishina, T.L. Gol'tseva // Tekhnologii additivnogo proizvodstva. – 2025. – T. 3. – № 2. – S. 34–39.
4. Tsaruk, Ye.I. Osobennosti postroyeniya 2D-chertezha vala-shesterni na osnove yego 3D-modeli v KOMPAS / Ye.I. Tsaruk, V.S. Yevdokimova // Innovatsionnyye tekhnologii v inzhenernoy grafike: problemy i perspektivy : sbornik trudov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. – 2023. – S. 253–257.
5. Turkenicheva, L.A. Postroyeniye razvortok v sisteme KOMPAS-3D / L.A. Turkenicheva, O.A. Turkenicheva // Innovatsionnyye tekhnologii v stroitel'stve i upravleniye tekhnicheskimi sostoyaniyem infrastruktury : sbornik nauchnykh trudov VI Vseros. nats. nauch.-prakt. konf., Rostov-na-Donu, 2024. – 2024. – S. 111–114.
6. Derbeneva, O.L. Peresecheniye poverkhnostey – metodika postroyeniy v KOMPAS-3D / O.L. Derbeneva // Problemy kachestva graficheskoy podgotovki studentov v tekhnicheskoy vuzе: traditsii i innovatsii. – 2019. – T. 1. – S. 233–235.
7. Dolgova, A.V. Avtomatizirovannoye postroyeniye ortogonal'nykh proyektsiy ploskosti obshchego polozheniya v SAPR KOMPAS-3D / A.V. Dolgova, S.V. Zaborovskikh // Nauka XXI veka: vyzovy, stanovleniye, razvitiye : sbornik statey XXIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Petrozavodsk, 2025. – 2025. – S. 391–396.
8. GOST 2.303–68. Yedinaya sistema konstruktorskoy dokumentatsii. Linii. – M. : Standartinform, 2007. – 9 s.
9. GOST R 2.104–2023. Yedinaya sistema konstruktorskoy dokumentatsii (YESKD). Osnovnyye nadpisi. – M. : Standartinform, 2024. – 8 s.
10. GOST R 2.201–2023. Yedinaya sistema konstruktorskoy dokumentatsii. Oboznacheniye izdeliy i konstruktorskikh dokumentov. – M. : Standartinform, 2024. – 16 s.
11. GOST 2.302–68. Masshtaby. – M. : Standartinform, 2007. – 4 s.

---

© Е.И. Игнатова, И.С. Фролов, Ф.В. Свойкин, 2026

УДК 665.71

О.О. ГОРШКОВА, Е.А. БРЫЗГАЛОВА, М.Э. ЛЮШНЕНКО

Филиал ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Сургут

## ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫДЕЛЕНИЯ ВОЗВРАТНОГО ИЗОБУТИЛЕНА

*Ключевые слова:* возвратный изобутилен; катализатор; нефтехимия; ректификационная колонна.

*Аннотация.* Целью работы явилось предложение решения по модернизации технологического процесса выделения возвратного изобутилена, ориентированного на повышение выхода изобутилена и сокращение его потерь.

Методы исследования: изучение, анализ и синтез специализированной литературы, исследований, научных публикаций по рассматриваемой проблеме; анализ и сравнение существующих технологий, практического опыта; моделирование процессов с использованием программного обеспечения: *Aspen Hysys, Aspen Plus, Pro II*. Выявлены возможные риски при внедрении предложенного решения, определены методы их минимизации. Обоснована эффективность предложенных решений на основе технико-экономических расчетов.

---

### Введение

В современных условиях нефтехимия все больше выступает как перспективно развивающаяся отрасль промышленности. В условиях санкционных ограничений одним из перспективных направлений нефтехимической промышленности является динамично развивающийся рынок изобутилена. Изобутилен представляет собой ненасыщенный углеводород необходимый для выпуска изопрена, который, в свою очередь, является основным компонентом в производстве синтетических изопреновых и бутиловых каучуков [4].

### Результаты исследования и их обсуждение

Анализ и систематизация современных исследований [3; 5] и др., результатов практического опыта показывают, что в существующем технологическом процессе производства изобутилена в российских нефтехимических компаниях фиксируется потеря 15–20 % ценного компонента вместе с кубовым потоком колонны. Это снижает эффективность процесса и увеличивает производственные затраты.

Цель работы – повысить выход изобутилена и сократить его потери за счет модернизации технологического процесса.

Для оптимизации работы ректификационной колонны проведено моделирование процесса в *Aspen HYSYS*, в результате определено, что эффективным решением является внедрение дополнительной колонны для кубового продукта (рис. 1).

Две колонны установлены последовательно. Сырьем второй колонны является кубовый продукт первой колонны, при изменении параметров работы первой колонны меняется состав куба, что сказывается на параметрах работы второй колонны (нагрузки на конденсатор, ребойлер). Вторая колонна производит тот же продукт, что и первая, но под другим давлением, что обусловлено разным составом сырья.

Кубовый остаток из первой подается в новую колонну; производится нагрев – через ребойлер с температурой 110 °С, далее идет разделение, верхний продукт (изобутилен 99,9 %) возвращается в основную колонну, внизу колонны формируется остаток с содержанием изобутилена < 0,1 %.

Система искусственного интеллекта *T-COMPLEX* управляет новой колонной в режиме реального времени, при этом выполняет следующие функции: автоматически корректи-

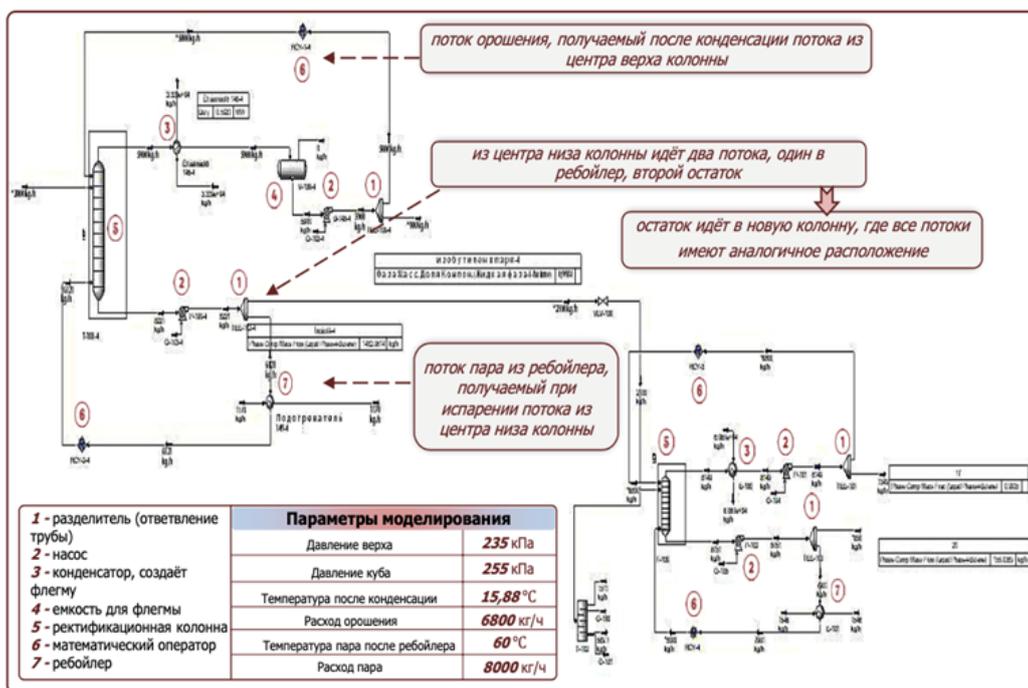


Рис. 1. Внедрение дополнительной колонны для кубового продукта

рует температуру/давление; прогнозирует загрязнение катализатора (интервалы замены); снижает нагрузку на операторов – контроль через единый интерфейс.

Использование инновационного катализатора КДИ-М обеспечивает максимальную эффективность, долговечность и экономию ресурсов, что делает его оптимальным выбором для промышленного производства изобутилена. Использование катализатора КДИ-М совместно с добавками  $SiO_2$  для подавления коксообразования способствует увеличению срока службы и защите частиц от спекания [6].

Геометрия новой колонны: 20 тарелок с подачей сырья на четвертую тарелку; диаметр – 0,78 м; масса колонны с тарелками примерно 1,5 тонны; масса нового конденсатора – 33 145 кг; масса нового ребойлера – 12 615 кг, содержание изобутилена в кубе упало с 1 482 до 146 кг.

Внедрение дополнительной колонны для кубового продукта с применением катализатора позволит достичь следующих результатов:

- экологический эффект: сокращение выбросов на 25 % за счет оптимизации регенерации катализаторов; соответствие ESG-стратегии: поддержка целей ООН (SDG 9, 12) и экономики замкнутого цикла;

- технологический эффект: рост производительности первой ректификационной колонны на 75,2 %; упрощение обслуживания: замена колпачковых тарелок на клапанные (увеличение срока службы на десять лет);

- экономический эффект включает в себя капитальные затраты, составляющие 81,6 млн руб., чистая приведенная стоимость (NPV) – 200,4 млн руб., внутренняя норма доходности (IRR) 53 %; операционные затраты: 53,2 млн руб. за счет сокращения энергопотребления и затрат на сырье; увеличение чистой прибыли после внедрения предложенного решения составит 39,9%; реализация решений позволит повысить выход изобутилена с 57,5 % до 99,9 %, производительность увеличится на 60,6 %; срок окупаемости проекта составляет два года; проект соответствует стратегии в области импортозамещения, устойчивого развития, усиления конкурентоспособности продукции на международных рынках [1].

Инновационность и новизна решения:

- внедрение катализатора КДИ-М, обеспечивающего максимальный выход изобутилена и высокую селективность при снижении стоимости;

- внедрение системы усовершенствован-

РИСКИ	ВЕРЯТНОСТЬ, %	РЕКОМЕНДАЦИИ
<b>Технические риски</b> 1.1 Недостаточная производительность оборудования 1.2 Проблемы интеграции 1.3 Энергетические ресурсы	45%	Провести моделирование колонны для проверки диаметра и числа тарелок Установить резервные датчики и дублирующие контуры управления для системы T-COMPLEX
<b>Эксплуатационные риски</b> 2.1 Сложность управления 2.2 Надежность оборудования 2.3 Технологические отклонения	25% 15%	Разработать программу обучения для операторов (работа с ИИ) Внедрить предварительные тесты системы T-COMPLEX на исторических данных
<b>Экономические риски</b> 3.1 Превышение бюджета 3.2 Низкая окупаемость	60% 40%	Предусмотреть резервный фонд, составить детальный сметный расчет, регулярно пересматривать бюджет на всех этапах
<b>Экологические риски</b> 4.1 Отходы 4.2 Утечки опасных веществ	15%	Установить анализатор для мониторинга утечек водорода
<b>Организационные риски</b> 5.1 Согласование изменений в технологическом регламенте 5.2 Конфликты между подрядчиками и персоналом завода	55% 20%	Создать рабочую группу из технологов, инженеров и IT-специалистов для координации проекта Провести пилотные испытания мембранного модуля на отдельной линии перед полномасштабным внедрением

Рис. 2. Возможные риски при реализации предложенного решения

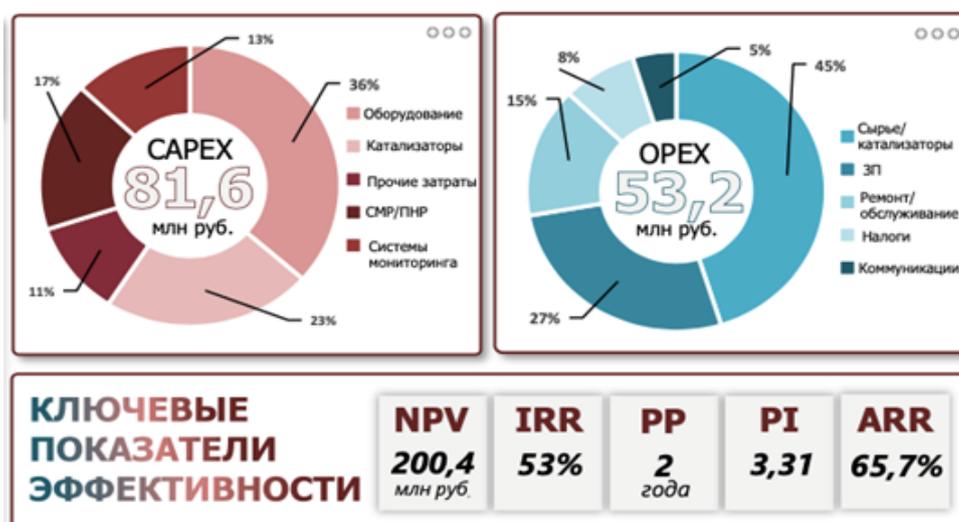


Рис. 3. Диаграммы показателей CAPEX и OPEX

ного управления технологическим процессом (СУУТП) – системы на основе нейронных сетей для оптимизации работы ректификационных колонн [2].

Высокая точность прогнозирования T-COMPLEX позволяет обрабатывать временные зависимости, оптимизируя работу колонны в различных режимах.

Нами определены возможные риски и способы их минимизации, которые представлены на рис. 2.

Таким образом, внедрение решения потенциально повысит выход изобутилена при со-

кращении потерь, это потребует тщательной проработки инфраструктурных, технических и кадровых вопросов. Ключевой фактор успеха – поэтапная реализация с постоянным мониторингом рисков.

На рис. 3 представлены диаграммы показателей CAPEX и OPEX по предлагаемому решению.

### Системы мониторинга и управления для ректификационных колонн

Современные системы мониторинга и

управления ректификационными колоннами представляют собой комплексные автоматизированные решения, обеспечивающие безопасность, стабильность и оптимизацию технологического процесса. Они включают: системы сбора данных с датчиков температуры, давления, расхода и состава потоков, обеспечивающие непрерывный контроль технологических параметров; системы автоматической стабилизации температуры и давления в различных зонах колонны, включая управление расходом флегмы и производительностью кипятильника; системы сигнализации и противоаварийной защиты; интеллектуальные системы мониторинга для оценки технического состояния оборудования, напряженно-деформированного состояния колонны и прогнозирования ресурса работы; автоматизированные рабочие места для визуализации, архивации данных и управления процессом в реальном времени; системы управления с микропроцессорными контроллерами для оптимизации процесса ректификации, компенсации возмущающих воздействий.

Дорожная карта реализации проекта включает шесть этапов (горизонт планирования 2030 г.):

- первый этап подготовительный – анализ, разработка технико-экономического обоснования, тендеры;
- второй и третий этапы: разработка проектной документации, закупка оборудования, монтаж дополнительной колонны и замена

тарелок;

– четвертый и пятый этапы: внедрение инноваций, таких как катализатор с редкоземельным элементом, и программного обеспечения (ПО) *T-Complex*;

– шестой этап: мониторинг и масштабирование проекта на другие предприятия в рамках стратегии развития бизнеса и экономики страны.

### Заключение

Внедрение дополнительной колонны для кубового продукта и использование катализатора позволят:

- сократить потери изобутилена в десять раз;
- повысить чистоту изобутилена с 57,5 % до 99,9 %;
- обеспечить рост производительности ректификационной колонны на 75,2 %;
- обеспечить повышение ресурса работы оборудования;
- сократить выбросы на 25 % за счет оптимизации регенерации катализаторов;
- увеличить чистую прибыль на 39,9 %.

Срок окупаемости проекта составит два года. Таким образом, внедрение предлагаемого решения обеспечит нефтехимическим компаниям долгосрочную конкурентоспособность на внутреннем и международном рынках нефтехимических продуктов.

### Список литературы

1. Березовская, Е.А. Теория и практика оценки эффективности инвестиционных проектов / Е.А. Березовская, С.В. Крюков. – Рост-на-Дону : Южный федеральный университет, 2019. – 104 с.
2. Заварухин, С.Г. Математическое моделирование химико-технологических процессов и аппаратов / С.Г. Заварухин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2022. – 86 с.
3. Минигалиев, Г.Б. Исследование различных схем получения изобутилена на основе математического моделирования / Г.Б. Минигалиев, Д.В. Елизаров // Вестник Казан. технол. ун-та, 2014. – С. 205–208.
4. Минскер, К.С. Изобутилен и его полимеры / К.С. Минскер, Ю.А. Сангалов. – М. : Химия, 1986. – 221 с.
5. Развитие технологии получения высококонцентрированного изобутилена / В. З. Кузьмин, И.А. Каюмов, И.И. Сафарова [и др.] // Катализ в промышленности. – 2014. – № 2. – С. 22–27.
6. Технологические перспективы импортозамещения в нефтегазохимическом комплексе / А.З. Шангараева, М.В. Журавлева, Г.Ю. Климентова [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2022. – № 2(42). – С. 77.

### References

1. Berezovskaya, Ye.A. Teoriya i praktika otsenki effektivnosti investitsionnykh proyektov /

- Ye.A. Berezovskaya, S.V. Kryukov. – Rost-na-Donu : Yuzhnyy federal'nyy universitet, 2019. – 104 s.
2. Zavarukhin, S.G. Matematicheskoye modelirovaniye khimiko-tekhnologicheskikh protsessov i apparatov / S.G. Zavarukhin. – Novosibirsk : Izd-vo NGTU, 2022. – 86 s.
  3. Minigaliyev, G.B. Issledovaniye razlichnykh skhem polucheniya izobutilena na osnove matematicheskogo modelirovaniya / G.B. Minigaliyev, D.V. Yelizarov // Vestnik Kazan. tekhnol. un-ta, 2014. – S. 205–208.
  4. Minsker, K.S. Izobutilen i yego polimery / K.S. Minsker, YU.A. Sangalov. – M. : Khimiya, 1986. – 221 s.
  5. Razvitiye tekhnologii polucheniya vysokokontsentririrovannogo izobutilena / V.Z. Kuz'min, I.A. Kayumov, I. I. Safarova [i dr.] // Kataliz v promyshlennosti. – 2014. – № 2. – S. 22–27.
  6. Tekhnologicheskiye perspektivy importozameshcheniya v neftegazokhimicheskom komplekse / A.Z. Shangarayeva, M.V. Zhuravleva, G.YU. Klimentova [i dr.] // Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik. – 2022. – № 2(42). – S. 77.
- 

© О.О. Горшкова, Е.А. Брызгалова, М.Э. Люшненко, 2026

УДК 658.012.2:621.865.8:377.5

*Н.В. САВЕЛЬЕВ, Л.С. ВОРОБЬЕВА, А.Н. САВЕЛЬЕВ*  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ВЫПУСКА И РЕАЛИЗАЦИИ ОБУЧАЮЩЕГО ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

*Ключевые слова:* импортозамещение; инвестиционный анализ; образовательная робототехника; обучающий промышленный робот; технико-экономическое обоснование; финансовое моделирование.

*Аннотация.* Цель работы – обоснование необходимости разработки и производства пятиосевого обучающего промышленного робота для эффективной подготовки кадров. Актуальность проекта обусловлена растущим спросом на подготовку квалифицированных кадров в области робототехники и автоматизации в условиях импортозамещения.

Задача – представление комплексного технико-экономического обоснования (ТЭО) проекта по разработке и производству пятиосевого обучающего промышленного робота.

Гипотеза: разработка отечественного пятиосевого обучающего промышленного робота с модульной конструкцией и адаптированным программным обеспечением (ПО) стоимостью на 30–50 % ниже импортных аналогов, позволит занять устойчивую рыночную нишу и существенно повысить эффективность подготовки кадров в области робототехники за счет обеспечения доступности современного практического оборудования.

Методы: комплексный подход, интегрирующий методы стратегического анализа, финансового моделирования и риск-менеджмента.

Достигнутые результаты: разработана финансовая модель, включающая прогноз производства и продаж 170 единиц продукции в 2026 г., расчет инвестиционных и операционных затрат, оценку денежных потоков и ключевых показателей эффективности.

### Введение

Современный этап технологического развития мировой промышленности характеризуется повсеместной интеграцией роботизированных комплексов в производственные процессы, что обуславливает возрастающий спрос на высококвалифицированных специалистов в области робототехники и автоматизации [1]. Эффективная подготовка таких кадров требует наличия современного, функционального и доступного образовательного оборудования, позволяющего отрабатывать практические навыки, что прямо следует из требований к материально-техническому обеспечению профильных образовательных программ [2]. Однако анализ российского рынка демонстрирует наличие существенного разрыва между потребностями образовательной системы и существующими коммерческими предложениями.

До 2022 г. рынок промышленной робототехники в России в значительной степени зависел от импортных решений таких лидеров, как *KUKA*, *FANUC* и *ABB* [3]. Несмотря на их высокое качество и функциональность, данные платформы обладают рядом критических для текущих условий недостатков, включая экстремально высокую стоимость, полную зависимость от импортных поставок и сервиса, а также недостаточную адаптацию к отечественным образовательным стандартам. С другой стороны, присутствующие на рынке отечественные аналоги, предлагая большую доступность и локализацию, зачастую уступают в функциональности, точности и возможностях для глубокого изучения конструкции, что ограничивает их эффективность в учебном процессе.

Сложившаяся ситуация актуализирует необходимость разработки нового поколения обучающего оборудования, которое сочетало бы в себе достоинства зарубежных аналогов – функциональную полноту и качество – с преимуществами отечественных решений – доступностью, адаптивностью и независимостью от внешних поставок. Создание такого продукта позволит не только закрыть существующий рыночный пробел, но и внести существенный вклад в обеспечение технологического суверенитета страны за счет подготовки высококвалифицированных инженерных кадров.

Целью настоящего исследования является комплексное технико-экономическое обоснование проекта по проектированию, выпуску и реализации пятиосевого промышленного робота, ориентированного на применение в образовательных учреждениях высшего и среднего профессионального образования. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи: проведение анализа конкурентной среды и определение целевых рыночных сегментов; разработка технической концепции и спецификаций продукта; построение детальной финансовой модели проекта с оценкой инвестиционных затрат, операционных расходов и прогнозируемых финансовых результатов; комплексная оценка рисков и ключевых показателей эффективности.

### Методология проведения ТЭО

Методологической основой исследования выступил комплексный подход, интегрирующий методы стратегического анализа, финансового моделирования и риск-менеджмента. Процедура технико-экономического обоснования реализована в соответствии с международными стандартами оценки инвестиционных проектов и включала последовательное выполнение следующих этапов.

1. Стратегический и маркетинговый анализ. На первоначальном этапе применен метод сравнительного конкурентного анализа с использованием инструментов *SWOT* и *PEST*-анализа. Исследование проводилось на основе данных отраслевых отчетов и официальной статистики [3; 4], что позволило сегментировать рынок образовательной робототехники и идентифицировать ключевые драйверы спроса. Для верификации рыночной гипотезы использован метод экспертных оценок с привлечением

представителей целевых сегментов – образовательных учреждений и промышленных предприятий.

2. Техничко-технологическое обоснование, которое включает в себя следующее.

2.1. Анализ рынка и компонентной базы. Проведен сравнительный анализ зарубежных (*ABB, KUKA, FANUC*) и отечественных (Аврора Роботикс, ГЕРЦ РОБОТИКС) аналогов с оценкой их функциональности, стоимости и применимости в образовательном процессе. Изучены доступность и технические характеристики ключевых компонентов: червячных редукторов *NMRV*, шаговых двигателей, микроконтроллера, подшипников, а также конструкционных материалов (алюминиевый профиль, фанера). Цель – формирование оптимальной спецификации, обеспечивающей баланс стоимости, надежности и локализации.

2.2. Функциональное и техническое моделирование. На основе анализа требований образовательного процесса составлено техническое задание, определяющее основные параметры робота (пять степеней свободы, точность позиционирования, грузоподъемность). Технические требования к роботу, включая аспекты безопасности, сформулированы в соответствии с ГОСТ Р 60.1.2.1-2016/ИСО 10218-1:2011 [5]. Разработана кинематическая схема и блок-схемы работы системы управления. Выбор в пользу собственной программной среды на базе *STM32* (с использованием *ST-LINK*) обоснован необходимостью глубокого изучения студентами основ робототехники, адаптивностью и снижением зависимости от импортных решений.

2.3. Экспертные оценки.

Для валидации технических решений и учебной ценности проекта проведены консультации с инженерами-робототехниками (оценка конструктивных решений, надежности компонентов) и преподавателями профильных учебных заведений (определение соответствия робота образовательным программам и потребностям в оснащении). Экспертные заключения использовались для корректировки технического задания и выбора наиболее релевантных функциональных возможностей.

3. Финансовое моделирование осуществлялось на горизонте планирования в один год (2026 г.) с месячной детализацией и основывалось на ряде допущений: объем производства – 170 единиц с динамикой наращивания с 1 до 30 ед./мес., ценовой диапазон – 170–250 тыс.

руб. в зависимости от комплектации и потребительского сегмента. Модель интегрировала прогноз продаж, калькуляцию себестоимости на основе спецификации материалов, расчет затрат на оплату труда для штата из шести сотрудников (АУП и ОПП), план инвестиционных затрат (550 тыс. руб.) и параметры кредитного финансирования (1 млн руб. под 25 % годовых). Ключевым итогом данного этапа стали разработка консолидированных бюджетов доходов и расходов (БДР) и движения денежных средств (БДДС), а также расчет системы показателей эффективности (маржинальность, *EBITDA*, чистая прибыль, рентабельность).

4. Анализ рисков и устойчивости. Применена система количественной и качественной оценки рисков с построением матрицы вероятности и воздействия. Для критических рисков разработаны сценарные модели и планы мероприятий по их минимизации. Устойчивость проекта протестирована через стресс-тестирование ключевых параметров в условиях пессимистичного сценария.

5. Верификация результатов. Заключительный этап включал независимую экспертизу расчетных показателей и кросс-проверку исходных данных. Для обеспечения достоверности результатов использован принцип консервативных оценок при формировании допущений модели.

### Результаты исследования

1. Результаты маркетингового анализа и конкурентного позиционирования. Проведенный анализ конкурентной среды выявил наличие устойчивой рыночной ниши для образовательных робототехнических комплексов стоимостью 170–250 тысяч руб. Установлено, что проектируемый продукт обладает конкурентными преимуществами по отношению к импортным аналогам (*KUKA*, *FANUC*, *ABB*) в виде адаптации к российским образовательным стандартам и сниженной на 30–50 % стоимости, а по отношению к отечественным аналогам («Аврора Роботикс», «ГЕРЦ РОБОТИКС») – превосходством по функциональной полноте и возможностям модульного конструирования.

2. Технические характеристики и производственные показатели. Разработана техническая спецификация пятиосевого робота в двух исполнениях: готовом к эксплуатации и конструкторском варианте. Производственная

программа на 2026 г. предусматривает выпуск 170 единиц продукции с поэтапным наращиванием объемов с 1 до 30 изделий в месяц. Нормативы расхода материалов рассчитаны для 30 позиций комплектующих, при этом доля материальных затрат в структуре себестоимости составляет 75 %, что подтверждает материалоемкость производства.

3. Финансово-экономические показатели проекта. По результатам финансового моделирования получены следующие ключевые показатели эффективности.

Годовая выручка от реализации составляет 36 300 000 руб.

Себестоимость реализованной продукции: 29 801 858 руб..

Маржинальная прибыль: 10 823 954 руб. (маржинальная рентабельность 29,93 %).

Чистая прибыль: 6 498 142 руб.

Рентабельность продаж (*ROS*): 17,97 %.

Показатель *EBITDA*: 8 644 598 руб. (*EBITDA margin* 23,91 %).

4. Бюджетирование и денежные потоки. Составлены бюджеты доходов и расходов (БДР) и движения денежных средств (БДДС) с помесечной детализацией. Расчет подтвердил отсутствие критических кассовых разрывов при условии привлечения кредитной линии в размере 1 000 000 руб. Прогнозируемое сальдо денежных средств на конец 2026 г. составляет 6 460 065 руб. Показатель *NPV* демонстрирует положительное значение, что свидетельствует об инвестиционной привлекательности проекта.

5. Анализ чувствительности и риск-менеджмент. Выявлены критические точки чувствительности проекта к изменению ключевых параметров: наиболее значительное влияние на финансовый результат оказывают колебания объема продаж ( $\pm 15\%$ ) и себестоимости материалов ( $\pm 10\%$ ). Разработаны компенсационные меры по каждому из идентифицированных рисков, включая диверсификацию поставщиков и создание страховых запасов критически важных компонентов.

### Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют высокую экономическую целесообразность и техническую реализуемость проекта. Выявленная в ходе маркетингового анализа рыночная ниша позволяет занять устойчивую позицию

в сегменте образовательной робототехники, что подтверждается расчетными показателями емкости рынка и прогнозируемыми объемами продаж. Ценовое позиционирование продукта на 30–50 % ниже зарубежных аналогов при сохранении функциональной полноты формирует устойчивое конкурентное преимущество и соответствует стратегии импортозамещения.

Структура себестоимости с преобладающей долей материальных затрат (75 %) характерна для машиностроительных производств, однако обуславливает повышенные риски, связанные с волатильностью цен на комплектующие и надежностью цепочек поставок. Разработанные меры по диверсификации поставщиков и созданию страховых запасов критически важных компонентов позволяют нивелировать данные риски. Положительная динамика ключевых финансовых показателей в течение планового периода свидетельствует о корректности выбранной стратегии поэтапного наращивания производственных мощностей.

Значения интегральных показателей эффективности ( $NPV > 0$ ,  $ROS = 17,97\%$ ) подтверждают инвестиционную привлекательность проекта. Сравнительный анализ с отраслевыми нормативами показывает, что достигнутый уровень рентабельности соответствует стандартам для проектов в области образовательной робототехники. Положительное сальдо денежных потоков на всем протяжении горизонта планирования демонстрирует финансовую устойчивость проекта. Расчет ключевых показателей эффективности ( $NPV$ ,  $IRR$ ) выполнен в соответствии с общепринятыми рекомендациями [6].

Выявленная в ходе анализа чувствительности зависимость финансовых результатов от колебаний объема продаж и себестоимости материалов указывает на необходимость реализации разработанного комплекса маркетинговых мероприятий и внедрения системы управления затратами. Сценарное моделирование подтвердило устойчивость проекта к негативным изменениям рыночной конъюнктуры в пределах 15–20 %.

Ограничением исследования являются до-

пущения, заложенные в основу финансовой модели, в частности – детерминированный характер прогноза объема продаж. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку стохастической модели с учетом вероятностного распределения ключевых параметров. Перспективы развития проекта связаны с расширением продуктовой линейки и выходом на смежные сегменты рынка промышленной робототехники. Концепция модульного учебного робота-конструктора согласуется с приоритетами развития образовательной робототехники, определенными в рамках Национальной технологической инициативы (НТИ) [7].

## Заключение

На основании комплексного технико-экономического анализа можно сделать следующие выводы.

1. Разработан проект отечественного обучающего промышленного робота, который полностью соответствует потребностям системы образования и обладает конкурентными преимуществами по цене, функциональности и адаптивности.

2. Финансовая модель проекта подтверждает его высокую экономическую эффективность и инвестиционную привлекательность. Прогнозируемая годовая выручка составляет 36,16 млн руб., чистая прибыль – 6,50 млн руб.

3. Проект характеризуется устойчивой положительной динамикой ключевых финансовых показателей и полной окупаемостью. Рентабельность продаж достигает 17,97 %.

4. Выявленные риски (рыночные, производственные, финансовые) являются управляемыми, а разработанные стратегии по их минимизации позволяют обеспечить успешную реализацию проекта.

Представленная методика комплексного ТЭО, сочетающая технический анализ с детальным финансовым моделированием, может быть тиражирована для обоснования других проектов в сфере импортозамещающего инженерного оборудования.

## Список литературы

1. О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации : указ Президента РФ от 28.02.2024. – № 145. – 2024.
2. Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника (уровень бакалав-

- риата) : приказ Минобрнауки России от 12.03.2015 № 206 (ред. от 09.09.2015). – 2015.
3. Исследование рынка промышленной робототехники 2025. – Иннополис : АНО ВО «Университет Иннополис», 2025. – 38 с.
  4. World robotics 2024 report // International Federation of Robotics. – 2024 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-of-4-million-robots-working-in-factories-worldwide>.
  5. ГОСТ Р 60.1.2.1–2016/ИСО 10218-1:2011. Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов. Часть 1. Роботы. – М. : Стандартинформ, 2016.
  6. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (утв. Минэкономки РФ, Минфином РФ, Госстроем РФ 21.06.1999 № ВК 477). – 1999.
  7. Перспективы и сценарии развития промышленной робототехники в рамках направления «Технет» НТИ в 2024 году : экспертно-аналитический доклад : монография / А.И. Боровков и др. ; под ред. А.И. Боровкова. – СПб. : Политех-Пресс, 2024. – 122 с.

### References

1. O Strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii : ukaz Prezidenta RF ot 28.02.2024. – № 145. – 2024.
2. Ob utverzhdenii federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo standarta vysshego obrazovaniya po napravleniyu podgotovki 15.03.06 Mekhatronika i robototekhnika (uroven' bakalavriata) : prikaz Minobrnauki Rossii ot 12.03.2015 № 206 (red. ot 09.09.2015). – 2015.
3. Issledovaniye rynka promyshlennoy robototekhniki 2025. – Innopolis : ANO VO «Universitet Innopolis», 2025. – 38 s.
4. World robotics 2024 report // International Federation of Robotics. – 2024 [Electronic resource]. – Access mode: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-of-4-million-robots-working-in-factories-worldwide>.
5. GOST R 60.1.2.1–2016/ISO 10218-1:2011. Roboty i robototekhnicheskiye ustroystva. Trebovaniya po bezopasnosti dlya promyshlennykh robotov. Chast' 1. Roboty. – М. : Standartinform, 2016.
6. Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh proyektov (utv. Minekonomiki RF, Minfinom RF, Gosstroyem RF 21.06.1999 № ВК 477). – 1999.
7. Perspektivy i stsenarii razvitiya promyshlennoy robototekhniki v ramkakh napravleniya «Tekhnet» NТИ v 2024 godu : ekspertno-analiticheskiy doklad : monografiya / A.I. Borovkov i dr. ; pod red. A.I. Borovkova. – SPb. : Politekh-Press, 2024. – 122 s.

---

© Н.В. Савельев, Л.С. Воробьева, А.Н. Савельев, 2026

УДК 681

И.В. ЧЕРНЕЦОВ, М.П. ПОТАПОВ

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный медицинский университет»

Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Ярославль

## РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ПРОТОТИПА РОБОТИЗИРОВАННОГО ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА С АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПАРАМЕТРАМИ ШКАЛЫ ШОТИ

*Ключевые слова:* аддитивные технологии; интубация трахеи; медицинское образование; роботизированный тренажер; симуляционное обучение; трудные дыхательные пути; шкала оценки трудности интубации (ШОТИ).

*Аннотация.* Неудовлетворительная подготовка к ситуации «трудных дыхательных путей» (ТДП) – одна из ведущих причин, связанных с осложнениями обеспечения проходимости верхних дыхательных путей, особенно, на догоспитальном этапе. Существующие тренажеры не обеспечивают комплексного и точно регулируемого изменения анатомических параметров в широком диапазоне параметров, оцениваемых по стандартной шкале ШОТИ.

Цель данной научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР) – рассмотреть и апробировать прототип роботизированного тренажерного комплекса, обеспечивающего автоматизированное, независимое и точное изменение всех моделируемых анатомических параметров шкалы ШОТИ.

На основе МСКТ-данных добровольца с ШОТИ 0 созданы анатомически точные 3D-модели. Костные структуры изготовлены методом FDM-печати из ABS-пластика, мягкие ткани – методом силиконового литья с дифференцированной твердостью (15-40 по Шору). Разработаны трехуровневая архитектура управления (ПК-клиент, Orange Pi Zero 2W-сервер, микроконтроллеры STM32) и проприетарный протокол связи. Система из восьми линейных приводов на основе шаговых двигателей NEMA 17 и драйверов шаговых двигателей обеспечивает изменение следующих параметров: подвижность шеи (шесть градаций с шагом в 10 градусов), открывание рта (шесть градаций), выдвижение нижней челюсти (четыре града-

ции), тироментальная дистанция (шесть градаций) и визуализация по Маллампати (четыре градации), длина шеи (четыре градации), смещение гортани вправо и влево (четыре градации). Дополнительно к моделированию параметров анатомии в фантоме реализована функция управляемой оператором регургитации. Комплекс оснащен системой обратной связи, регистрирующей вентиляцию легких, вентиляцию желудка и контакт с зубами.

В результате работ создан прототип тренажера, позволяющий программно задавать около 55 296 уникальных анатомических комбинаций параметров ШОТИ. Предварительная апробация с участием пяти опытных анестезиологов подтвердила базовую анатомическую реалистичность прототипа и исправную работу всех систем обратной связи. Субъективно все эксперты отметили, что прототип комплекса функционально не уступает коммерческому аналогу – Laerdal SimMan 3G – за счет полной автоматизации параметров ШОТИ.

Разработанный комплекс представляет собой новое решение для симуляционного обучения, впервые обеспечивающее комплексное и автоматизированное управление всеми моделируемыми параметрами шкалы ШОТИ. Высокая анатомическая достоверность и система объективной обратной связи создают стандартизованную и воспроизводимую среду для формирования и оценки практического навыка.

### Введение

Обеспечение проходимости верхних дыхательных путей (ВДП) – критически важный навык в анестезиологии, реаниматологии и

Таблица 1. Сравнение материалов для изготовления костных структур, ключевые параметры

Параметр	АБС	ПЭТФ Г-80	Нейлон-подобный фотополимер	АБС-подобный фотополимер
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,05	1,4	1,10–1,20	1,05–1,25
Прочность на изгиб, МПа	65,4	76,1	25±6,5	35–40
Модуль упругости, МПа	1 177–2 340	3 500	280±30	1 400–1 800
Температура эксплуатации, макс. °С	+90	+70	+60	+80

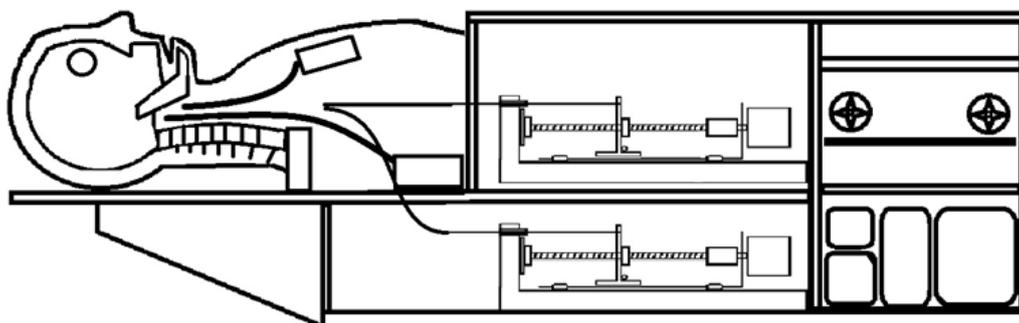


Рис. 1. Схематичное представление роботизированного фантома

скорой медицинской помощи. Статистические данные свидетельствуют о сохраняющейся высокой доле осложнений, связанных с трудной интубацией: от 5 до 35 неудачных попыток на 10 000 процедур [1; 2]. Решающим фактором успешного управления ВДП является уровень практической подготовки специалиста [3].

Основным инструментом для предклинической отработки данного навыка являются симуляционные тренажеры. Однако, как показывают анализ и опыт, большинство существующих коммерческих решений (например, *Laerdal SimMan 3G*, *Deluxe Difficult Airway Trainer*) имеет существенный недостаток: они не обеспечивают комплексного и дозированного изменения всех параметров, входящих в шкалу ШОТИ – «золотой стандарт» предоперационной оценки ВДП [4; 5]. Как правило, изменение «трудности» в них достигается лишь механическим ограничением подвижности в шейном отделе и височно-нижнечелюстном суставе, что не отражает всего многообразия клинических анатомических вариаций.

Целью настоящего исследования были

разработка и создание роботизированного тренажерного комплекса, обеспечивающего автоматизированное, независимое и точное моделирование всего спектра анатомических параметров шкалы ШОТИ в контролируемых условиях.

#### Анатомическое моделирование и прототипирование

Для создания анатомической основы фантома на основе данных МСКТ добровольца с показателем ШОТИ 0 баллов были реконструированы высокодетализированные 3D-модели ключевых структур: кости черепа, шейные и первый грудной позвонки, нижняя челюсть, гортань, трахея. После сравнительного анализа материалов (табл. 1) для изготовления костных структур был выбран АБС-пластик, изготовленный методом *FDM*-печати с высотой слоя 0,15 мм и заполнением 75 %.

Мягкие ткани (язык, слизистые, кожа) изготовлены методом силиконового литья с дифференцированной твердостью по Шору (15–40 единиц). Для обеспечения подвижности

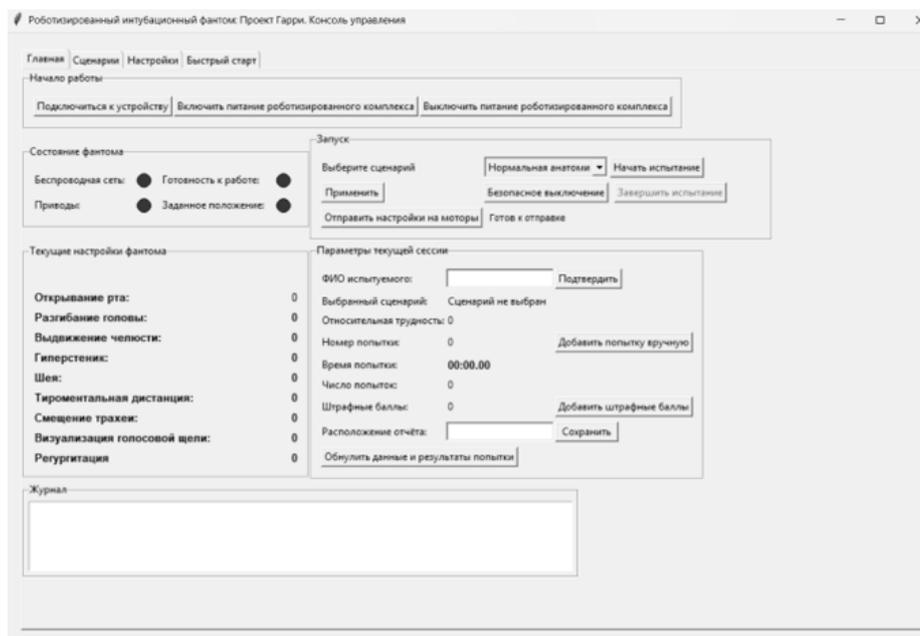


Рис. 2. Внешний вид графического интерфейса пользователя (клиентская программа)

в суставах использована комбинация никель-титановой низкотемпературной проволоки и пенополиуретановых прокладок. Схематично роботизированный фантом представлен (в разрезе) на рис. 1.

### Аппаратно-программный комплекс и система приводов

Управление тренажером реализовано по трехуровневой архитектуре.

Уровень клиента: программное обеспечение на *Python* с графическим интерфейсом (операционная система (ОС) *Windows/Linux/macOS*).

Уровень сервера: одноплатный компьютер *Orange Pi Zero 2W (OS Armbian)*.

Уровень исполнительных устройств: три микроконтроллерных модуля на базе *STM32F103C8T6*, управляющие восьмишаговыми двигателями *NEMA 17* через драйверы *TMC2209*.

Клиентская часть программного обеспечения для удобства пользователя создана с графическим пользовательским интерфейсом. Внешний вид представлен на рис. 2.

Клиент и сервер связываются друг с другом по беспроводному протоколу связи, что позволяет удаленно контролировать процесс выполнения процедуры. Сервер и исполнительные

устройства размещены на специально спроектированной двухслойной печатной плате (*FR-4*, 1.6 мм). Для передачи данных между клиентом и сервером использован проприетарный протокол обмена данными с контролем целостности данных.

Система из восьмилинейных приводов обеспечивает независимое изменение параметров ШОТИ с помощью тросовой передачи.

Подвижность шеи: шесть градаций (с шагом  $10^\circ$  от исходного положения в  $90^\circ$ , от  $130^\circ$  до  $80^\circ$ ).

Открытие рта: шесть градаций (максимальное расстояние 6 см).

Выдвижение нижней челюсти: четыре градации.

Тироментальная дистанция: шесть градаций.

Длина шеи (и связанная с ней грудноментальная дистанция): четыре градации.

Визуализация по Маллампасти: четыре градации (1–4 класс).

Смещение гортани вправо и влево от средней линии: четыре градации (исключая нейтральное положение, по 1,5 см в каждую сторону).

Комбинация семи указанных параметров в пределах доступных градаций ( $6 \times 6 \times 4 \times 6 \times 4 \times 4 \times 4$ ) дала в результате 55 296 возможных анатомических вариантов ВДП.

Таблица 2. Сравнительная характеристика тренажеров

Параметр	<i>Laerdal SimMan 3G</i>	Разработанный прототип
Автоматическое изменение параметров ШОТИ	Ограниченное (подвижность шеи, челюсти)	Полное (семь анатомических параметров, до 55 296 комбинаций анатомии ВДП)
Возможность регургитации	Да	Да
Автоматическая генерация отчета	Нет	Да (формат <i>JSON</i> )
Анатомическая основа	Усредненная модель	На основе МСКТ реального пациента (ШОТИ 0)
Расширяемая архитектура	Нет	Да

### Система обратной связи и валидации

Комплекс оснащен системой датчиков, регистрирующих действия обучающегося.

Контактные датчики вентиляции в каждом «легком» (срабатывание при раздувании  $\geq 250$  мл).

Датчик растяжения «желудка» (геркон с магнитом) для фиксации неправильной вентиляции с раздуванием «желудка».

Концевой выключатель контакта ларингоскопа с зубами.

Восемь герконов для определения крайних положений приводов.

Предварительная оценка работоспособности прототипа фантома проводилась при участии пяти врачей анестезиологов-реаниматологов. Испытание на данном этапе разработки было направлено на субъективную оценку опытными специалистами функциональности прототипа, а именно – на оценку анатомического соответствия устанавливаемых анатомических параметров ВДП фантома вариантам анатомии реальных пациентов, которые встречались в клинической практике специалистов. Исследование проводилось следующим образом: через клиентскую программу на фантоме задавались параметры анатомии верхних дыхательных путей, соответствующие запросу специалиста. После установки параметров специалист оценивал результат по ШОТИ, проводил прямую ларингоскопию и высказывал свое мнение о соответствии анатомии ВДП фантома ожидаемой анатомической картине. Критерий отнесения к удовлетворительному результату – позитивная субъективная оценка. В результате апробации все специалисты отметили соответ-

ствие заданных параметров своим ожиданиям.

### Функционирующий прототип и его характеристики

В результате работы был создан полнофункциональный прототип роботизированного тренажера. Габаритные размеры комплекса составляют  $1\,500 \times 400 \times 300$  мм. Комплекс позволяет программно задавать до 55 296 уникальных комбинаций параметров ШОТИ, покрывая весь диапазон от 0 до 5+ баллов. Клинические сценарии могут быть как выбраны из готового набора, так и дополнительно созданы и сохранены оператором фантома. Точность позиционирования приводов обеспечивается использованием шаговых двигателей с микрошагом от драйверов *TMC2209* и фиксацией крайних положений герконами.

### Результаты предварительной апробации

Все пять участников пилотного исследования отметили высокую анатомическую реалистичность фантома и количество возможных имитируемых анатомических сценариев, превосходящие таковые при работе с коммерческим аналогом *Laerdal SimMan 3G*. Была отмечена бесперебойная работа системы обратной связи: датчики корректно регистрировали все попытки вентиляции, эпизоды регургитации (смоделированные оператором) и контакты с зубами. Сгенерированные системой отчеты в формате *JSON* содержали полную хронологию манипуляции с временными метками. На основе обратной связи пользователей в клиентское программное обеспечение (ПО) был до-

бавлен режим «Быстрый старт» с протоколом испытания и разработана инструкция пользователя.

Проведенное сравнение с коммерческим аналогами (табл. 2) демонстрирует конкурентные преимущества разработанного прототипа.

## Обсуждение

Разработанный роботизированный комплекс представляет собой значительный шаг вперед в области симуляционного обучения в анестезиологии. Ключевым результатом работы является реализация принципиально нового подхода – точного, автоматизированного и независимого управления всеми компонентами шкалы ШОТИ. Это позволяет не только создавать стандартизированные условия для оценки навыков, но и реализовывать адаптивные сценарии обучения.

Главное преимущество разработанного прототипа – полная автоматизация изменения параметров ШОТИ. В отличие от аналогов, где изменение «трудности» часто сводится к механическому ограничению подвижности, разработанный комплекс позволяет независимо варьировать каждый параметр, что точнее отражает клиническое многообразие.

Важным аспектом является открытость и модульность архитектуры. Использование микроконтроллеров *STM32*, стандартизированных протоколов обмена (*SPI*) и ПО на *Python* создает основу для дальнейшего расширения системы.

Ограничением настоящего исследования является малая выборка для валидации на данном этапе разработки. Однако исправная работа всех систем прототипа и положительные субъективные отзывы опытных специалистов позволяют с оптимизмом оценивать его перспективы, а полноценное исследование эффективности применения фантома в образовательном процессе будет проведено на следующем этапе со статистической обработкой результатов и по-

строением кривой освоения навыка.

На данный момент полученный прототип устройства продемонстрировал возможность создания конкурентоспособного роботизированного комплекса имитации анатомии ВДП человека. Полученные в ходе работ технические и программно-аппаратные решения будут использованы в финальном устройстве, после внесения необходимых доработок – оптимизации массогабаритных характеристик неанатомической части прототипа и улучшения пользовательских свойств.

## Заключение

Разработан и предварительно апробирован прототип роботизированного тренажерного комплекса, обеспечивающий комплексное и независимое автоматизированное управление всеми анатомическими параметрами, оцениваемыми по шкале ШОТИ, с возможностью создания уникальных клинических сценариев с большим количеством возможных комбинаций параметров анатомии ВДП. Применение современных технологий (аддитивное производство на основе МСКТ-данных, трехуровневая система управления на базе *STM32* и *Python*, проприетарный протокол связи) обеспечило высокую анатомическую достоверность, функциональную надежность и потенциал для масштабирования системы. Предварительная апробация подтвердила функциональную состоятельность прототипа. Кроме того, прототип фантома не уступает существующим коммерческим аналогам за счет полной автоматизации и объективизации процесса обучения. Дальнейшие исследования будут направлены на проведение масштабных клинико-педагогических испытаний для количественной оценки эффективности обучения на разработанном комплексе и на дальнейшее усовершенствование конструкции по результатам испытаний с перспективой внедрения доработанного образца в образовательный процесс.

*Работа выполнена при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «Ярославский государственный медицинский университет» Минздрава России.*

## Список литературы

1. Joffe, A.M. Management of difficult tracheal intubation / A.M. Joffe, [et al.] // *Anesthesiology*. – 2019. – Vol. 131. – No. 4. – P. 818–829.
2. Kheterpal, S. Incidence and predictors of difficult and impossible mask ventilation / S. Kheterpal,

[et al.] // Anesthesiology. – 2006. – Vol. 105. – No. 5. – P. 885–891.

3. Андреевко, А.А. Трудные дыхательные пути у взрослых в стационаре (четвертый пересмотр, 2025 г.) / А.А. Андреевко, И.В. Братищев, С.В. Гаврилов, А.Ю. Зайцев, М.А. Магомедов, В.Ю. Пиковский, В.В. Стадлер, В.И. Стамов // Вестник интенсивной терапии имени А.И. Салтанова. – 2025. – № 3. – С. 7–50.

4. Apfelbaum, J.L. 2022 American Society of Anesthesiologists practice guidelines for management of the difficult airway / J.L. Apfelbaum, et al. // Anesthesiology. – 2022. – Vol. 136. – No. 1. – P. 31–81.

5. Samssoon, G.L.T. Difficult tracheal intubation: a retrospective study / G.L.T. Samssoon, J.R.B. Young // Anaesthesia. – 1987. – Vol. 42. – No. 5. – P. 487–490.

### References

3. Andreyenko, A.A. Trudnyye dykhatel'nyye puti u vzroslykh v statsionare (chetvertyu peresmotr, 2025 g.) / A.A. Andreyenko, I.V. Bratishchev, S.V. Gavrilo, A.YU. Zaytsev, M.A. Magomedov, V.YU. Pikovskiy, V.V. Stadler, V.I. Stamov // Vestnik intensivnoy terapii imeni A.I. Saltanova. – 2025. – № 3. – S. 7–50.

---

© И.В. Чернецов, М.П. Потапов, 2026

УДК 658.562

Л.Г. АМИРХАНИЯН, Е.В. ЛЯПУНЦОВА

ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет

имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ДЕТЕКЦИИ ДЕФЕКТОВ

*Ключевые слова:* визуальный контроль; гибридная интеллектуальная система; детекция дефектов; машинное обучение; нечеткая логика.

*Аннотация.* Актуальность исследования определяется необходимостью обеспечения устойчивой работы промышленных систем диагностики в нестационарной производственной среде, характеризующейся наличием зашумленных данных, вариативностью условий съемки и неоднозначностью дефектов. Целью являются разработка и обоснование гибридной архитектуры для классификации дефектов, сочетающей достоинства сверточных нейронных сетей и нечеткой логики для повышения устойчивости решений в сложных условиях. Первично анализируются возможности и ограничения стандартных методов машинного обучения, таких как сверточные нейронные сети (CNN), которые наиболее часто используются при обработке изображений. Для преодоления указанных ограничений предлагается гибридная архитектура, комбинирующая способность CNN к выделению признаков и возможность нечеткой логики обрабатывать неточные сигналы от нескольких локальных классификаторов и агрегировать их для получения окончательного решения. В статье приводится математическое обоснование и описание гибридной модели на основе применения методов теории нечетких множеств и нечеткого логического вывода.

### Введение

Современные промышленные и производственные комплексы характеризуются высокой степенью автоматизации технологических про-

цессов, что императивно требует обеспечения надлежащего и стабильного уровня качества выпускаемой продукции. В данном контексте ключевым условием поддержания производственных стандартов является повсеместное внедрение систем автоматического визуального контроля (АВК). Функционирование таких систем базируется на интеллектуальных алгоритмах машинного обучения, ориентированных на анализ изображений и выявление аномалий [6].

Стандартным подходом в АВК является применение глубоких сверточных нейронных сетей (CNN), которые проходят обучение на размеченных эмпирических выборках для осуществления бинарной или мультиклассовой классификации объектов на категории «годные» и «дефектные». Их ключевое преимущество заключается в способности к автоматическому извлечению иерархических признаков высокого уровня абстракции из исходных данных [1]. Однако в условиях реального промышленного производства процесс идентификации дефекта зачастую не подлежит редукции к простой бинарной логике. Типичный производственный брак может манифестировать себя как совокупность слабовыраженных аномалий, включающих, например, микротрещины, локальные и незначительные колориметрические изменения или малые геометрические деформации [11]. Каждая из этих аномалий, рассмотренная изолированно, может не превышать допустимых пороговых значений. Тем не менее их совместное или кумулятивное присутствие с высокой степенью достоверности указывает на наличие производственного брака. Существующие монолитные CNN-классификаторы, функционирующие как детерминированные «черные ящики», не обладают необходимой степенью интерпретируемости и необходимой устойчивостью

для надежной и обоснованной агрегации подобных слабых и нечетких сигналов [10]. Уязвимость по отношению ко входным данным, которые практически неразличимы для человеческого восприятия, приводит к ошибочной классификации – это общее явление для различных типов глубоких нейронных сетей, например, сверточных нейронных сетей (*CNN*), рекуррентных нейронных сетей (*RNN*), при решении различных задач компьютерного зрения, например, распознавания, сегментации и обнаружения [4]. Таким образом, возникает актуальная и нерешенная задача разработки интеллектуальной системы, которая была бы способна выявлять и формализовать эти субкритические признаки и интегрировать их в логически обоснованное итоговое диагностическое решение с учетом нелинейных межфакторных взаимосвязей.

Целью исследования является разработка и теоретико-математическое обоснование архитектуры гибридной интеллектуальной системы. Указанная система предполагает интеграцию сверточной нейронной сети для сегментации и классификации признаков с аппаратом нечеткой логики для окончательной верификации и принятия решений. Применение нечеткой логики обусловлено необходимостью эффективной обработки информации, характеризующейся неопределенностью и неполнотой исходных данных, что является типичным для реальных производственных условий [9].

### Основная часть

Рассмотрим процесс детекции дефектов на примере использования стандартного алгоритма машинного обучения. Пусть  $I$  – входное изображение контролируемого объекта. Задача состоит в отнесении объекта к одному из классов:  $C_0$  (годен) или  $C_1$  (имеется дефект).

Предположим, что у нас есть  $N$  независимых экспертов, каждый из которых анализирует определенный аспект объекта. В качестве таких «экспертов» в предлагаемой архитектуре выступают выходные значения сверточной сети (*Multi-Head CNN*), где каждая «голова» специализируется на детекции определенного типа аномалий (трещины, изменение цвета и т.д.). Каждый  $i$ -й детектор выдает численную оценку  $x_i \in [0, 1]$ , которая отражает степень уверенности в наличии  $i$ -ого типа аномалии.

Таким образом, объект  $I$  описывается век-

тором признаков, поскольку в общем случае *CNN* вычисляет тензор, сформированный путем конкатенации выходных значений карт признаков [8]:

$$\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N), x_i \in [0, 1],$$

где  $x_i$  – выходное значение функции активации для  $i$ -ого детектора.

В классической постановке можно было бы ввести пороговые значения  $S_i$  и принять решение по правилу большинства или с помощью линейного классификатора:

$$C = C_1, \text{ если } \sum_1^N w_i \cdot x_i > S,$$

где  $w_i$  – весовой коэффициент выходного значения функции активации;  $S$  – общее пороговое значение.

Тем не менее представленный подход демонстрирует ограничения в отношении учета следующих ключевых аспектов.

1. Нелинейность взаимосвязей [7]: совместное проявление двух индивидуально не критических дефектов может обуславливать критическое состояние системы или объекта, в то время как их изолированное наличие не приводит к дестабилизации. Этот феномен плохо моделируется линейными комбинациями.

2. Аппарат нечетких лингвистических переменных: например, значение  $x_i = 0,65$  не следует интерпретировать как вероятность 65 % существования дефекта. Данное значение отражает степень принадлежности к множеству «высокая степень проявления признака дефекта» и функционирует как лингвистическая переменная, а не как вероятностная мера. Именно эти лингвистические переменные и будут являться входными данными для системы нечеткого вывода, где с помощью набора правил будет сформировано итоговое решение.

Решить данное ограничение предлагается при помощи симбиоза сверточной нейронной сети и аппарата нечеткой логики. Нечеткая логика, основанная на принципах теории множеств, предоставляет возможность учитывать неопределенности и неточности в данных, что особенно важно в контексте слабых и неполных сигналов, поступающих от множества локальных детекторов. Такой подход позволяет не только улучшить качество агрегации инфор-

мации, но и повысить устойчивость системы к шумам и вариациям во входных данных. Приведем математическое обоснование гибридной модели.

Каждая переменная  $x_i$  преобразуется в нечеткую переменную с помощью набора функций принадлежности. Для простоты определим для каждого  $x_i$  две термы: низкое значение степени уверенности наличия дефекта ( $L$ ) и высокое значение степени уверенности наличия дефекта ( $H$ ). В качестве функций принадлежности используем  $Z$ -образные (для  $L$ ), так как  $Z$ -образные функции принадлежности используются для задания неопределенностей типа «небольшое значение», «незначительная величина», «низкий уровень», и  $S$ -образные (для  $H$ ) функции, поскольку при помощи  $S$ -образных функций принадлежности можно задать неопределенности типа «большое значение», «значительная величина», «высокий уровень» [3]. Приведем ниже аналитическое представление для каждой из терм:

$$f_L(x_i; a, b) = \begin{cases} 1, & x_i \leq a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \cos\left(\frac{x_i - a}{b - a} \pi\right), & a \leq x_i \leq b \\ 0, & x_i > b \end{cases}$$

$$f_H(x_i; a, b) = \begin{cases} 0, & x_i \leq a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \cos\left(\frac{x_i - b}{b - a} \pi\right), & a \leq x_i \leq b \\ 1, & x_i > b \end{cases}$$

где  $a, b, c, d$  – некоторые параметры, настраиваемые экспертом или в процессе обучения модели.

Процесс формирования базы нечетких правил требует строгой формализации лингвистических переменных, участвующих в принятии решения. Решение о дефекте ( $y$ ), отражающее диагностический вердикт относительно качества объекта, также определяется как лингвистическая переменная. Терм-множество этой переменной включает два нечетких термина: годная продукция ( $P$ ) и продукция с браком ( $F$ ). Логика финального классификационного решения формализуется в виде условных правил. Лингвистические переменные, входящие в состав антецедентов (условий), определяются как входные переменные, в то время как переменные, присутствующие в консеквентах, являются выходными переменными. Пример базы

правил следующий.

1. IF  $x_1$  is  $H$  AND  $x_2$  is  $H$  THEN  $y$  is  $F$ .
2. IF  $x_2$  is  $H$  AND  $x_3$  is  $H$  THEN  $y$  is  $F$ .
3. ...
4. IF  $x_1$  is  $L$  AND  $x_2$  is  $L$  AND  $x_3$  is  $L$  AND... AND  $x_N$  is  $L$  THEN  $y$  is  $P$ .
5. IF  $x_1$  is  $H$  AND  $x_2$  is  $L$  AND  $x_3$  is  $L$  AND... AND  $x_N$  is  $L$  THEN  $y$  is  $P$  (с меньшим весом).
6. ...

Активизация консеквентов (подзаключений) каждого  $j$  – го правила вычисляется по методу минимума:

$$b_j = \min \{ \mu_{B_{j1}}(x_1), \mu_{B_{j2}}(x_2), \dots, \mu_{B_{jN}}(x_N) \},$$

где  $b_j$  представляет собой степень истинности  $j$ -го антецедента, а  $\mu_{B_{ji}}(x_i)$  – степени истинности  $i$ -го подусловия в составе  $j$ -го антецедента.

Выходы всех правил агрегируются в нечеткое множество для выходной переменной  $Y$ . Результатом аккумуляции для каждой выходной переменной является объединение нечетких множеств, соответствующих всем консеквентам правил нечеткой базы относительно этой переменной. Объединение функций принадлежности консеквентов реализуется классической операцией над нечеткими множествами:

$$\forall j \in J_F \mu_F(y) = \max\{b_j\},$$

где  $J_F$  – множество правил, в заключении которых стоит терм  $F$ .

Для получения четкого бинарного решения применяется метод центра тяжести для дефаззификации. Данный метод предполагает интерпретацию функции принадлежности как системы материальных точек, где значения функции принадлежности соответствуют массам этих точек. Выходная переменная  $Y_{final}$  вычисляется как:

$$Y_{final} = \frac{\int_{min}^{max} y * \mu_F(y) dx}{\int_{min}^{max} \mu_F(y) dx},$$

где  $y$  – переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной;  $\mu_F(y)$  – функция принадлежности нечеткого множества, соответствующего выходной лингвистической переменной  $y$ ;  $[Min, Max]$  – носитель нечеткого множества выходной лингвистической переменной  $y$ .

Окончательное решение принимается путем сравнения  $Y_{final}$  с пороговым значением  $S$ :

$$C = \begin{cases} C_1, & \text{если } Y_{final} > S; \\ C_0, & \text{в ином случае.} \end{cases}$$

### Выводы

Разработанная гибридная модель представляет собой прогрессивное решение проблемы децентрализации и агрегации информации в сложных системах детектирования дефектов, что является актуальной задачей в области автоматизированной диагностики. Основное преимущество данной модели заключается в ее способности интегрировать высокопроизводительные средства сверточного анализа признаков, основанные на архитектурах сверточных нейронных сетей (CNN), с формализованным аппаратом нечеткой логики.

Сверточные нейронные сети зарекомендовали себя как эффективные инструменты для извлечения значимых признаков из сложных и

многомерных данных, что позволяет значительно повысить точность первичного детектирования дефектов [5]. Однако, несмотря на их высокую производительность, чистые нейросетевые архитектуры часто страдают от недостатка прозрачности, что делает процесс финального принятия решения трудным для интерпретации, в отличие от варианта интеграции нечеткой логики и нейронных сетей, который обеспечивает интерпретируемый механизм агрегации данных, позволяя использовать лингвистические переменные и правила для обработки входных сигналов.

Теоретико-математическое описание предложенной модели подтверждает ее валидность и принципиальную пригодность для дальнейшей программной имплементации в реальных диагностических системах. Таким образом, достигнута основная цель – создание архитектуры, способной адекватно работать с неопределенностью на этапе принятия решения, что открывает новые горизонты для применения в области автоматизированного мониторинга и диагностики.

### Список литературы

1. Солоха, П.М. Обнаружение и распознавание растений в природе с использованием сверточных нейронных сетей / П.М. Солоха, Е.С. Нестругина // Вестник Донского государственного университета. Серия 04: Естественные науки. – 2025. – № 1. – С. 43–54.
2. Сараев, А.А. Формирование моделей организации сервисного обслуживания сложной техники на основе морфологического анализа / А.А. Сараев, И.Д. Сидельников, А.Е. Бром, Л.Г. Амирханян // Наука и бизнес: пути развития. – 2024. – № 2(152). – С. 127–134.
3. Чернов, В.Г. Нечеткие множества. Основы теории и применения: учебное пособие / В.Г. Чернов // Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018. – 156 с.
4. Akhtar, N. Threat of Adversarial Attacks on Deep Learning in Computer Vision: A Survey / N. Akhtar, A. Mian // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 11590–11605.
5. Alzubaidi, L. Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions / L. Alzubaidi, J. Zhang, A. J. Humaidi // Journal of Big Data. – 2021. – Vol. 8. – No. 1. – Art. No. 53.
6. Aust, J. Automated Defect Detection and Decision-Support in Gas Turbine Blade Inspection / J. Aust, S. Shankland, D. Pons, R. Mukundan, A. Mitrovic // Aerospace. – 2021. – Vol. 8. – No. 1. – P. 30.
7. He, K. Deep Residual Learning for Image Recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2016. – P. 770–778.
8. Kaya, Y. A novel multi-head CNN design to identify plant diseases using the fusion of RGB images / Y. Kaya, E. Gürsoy // Ecological Informatics. – 2023. – Vol. 75. – Art. No. 102083.
9. Sharma, P. Building and Testing a Fuzzy Linguistic Assessment Framework for Defect Prediction in ASD Environment Using Process-Based Software Metrics / P. Sharma, A. Sangal // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2020. – Vol. 45. – P. 1–25.
10. Zhang, J. A Multi-Head Convolutional Neural Network With Multi-path Attention improves

Image Denoising / J. Zhang, M. Qu, Y. Wang, L. Cao. – 2022. – Preprint.

11. Zhang, Z.K. IDD-Net: Industrial defect detection method based on Deep-Learning / M. Zhou, H. Wan, M. Li, G. Li, D. Han // Engineering Applications of Artificial Intelligence – 2023. – Vol. 123. – P. 106390.

### References

1. Solokha, P.M. Obnaruzheniye i raspoznavaniye rasteniy v prirode s ispol'zovaniyem svertochnykh neyronnykh setey / P.M. Solokha, Ye.S. Nestrugina // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 04: Yestestvennyye nauki. – 2025. – № 1. – S. 43–54.

2. Sarayev, A.A. Formirovaniye modeley organizatsii servisnogo obsluzhivaniya slozhnoy tekhniki na osnove morfologicheskogo analiza / A.A. Sarayev, I.D. Sidel'nikov, A.Ye. Brom, L.G. Amirkhanyan // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2024. – № 2(152). – S. 127–134.

3. Chernov, V.G. Nechetkiye mnozhestva. Osnovy teorii i primeneniya: uchebnoye posobiye / V.G. Chernov // Vladimirskiy gosudarstvennyy universitet imeni Aleksandra Grigor'yevicha i Nikolaya Grigor'yevicha Stoletovyykh. – Vladimir: Izd-vo VIGU, 2018. – 156 s.

---

© Л.Г. Амирханян, Е.В. Ляпунцова, 2026

УДК 69.057: 615.072

М.Н. БЕЛАЯ, А.А. ГААГ

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ БЕРЕЖЛИВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

*Ключевые слова:* инструменты бережливого строительства; исполнительная документация; технологии информационного моделирования; *Last Planner System*; *Value Stream Mapping*.

*Аннотация.* Статья посвящена анализу процессов формирования исполнительной документации в строительной отрасли, их роли в обеспечении качества и соответствия выполненных работ проектным требованиям. Особое внимание уделяется современным тенденциям и методам оптимизации этих процессов с целью повышения эффективности управления строительными проектами.

Цель статьи заключается в анализе процессов формирования исполнительной документации в строительстве, выявлении основных проблем и особенностей их решения и определении перспектив применения инструментов бережливого строительства для повышения эффективности и качества исполнительной документации.

Гипотеза исследования заключается в том, что внедрение современных информационных технологий и инструментов бережливого строительства в процессы формирования исполнительной документации значительно повышает их эффективность, сокращая время, трудозатраты и объем документооборота, а также способствует адаптации процессов к динамике современных строительных проектов.

Научные методы, использованные в данной статье: анализ, обобщение и синтез.

Основным результатом работы является подтверждение высокой эффективности внедрения технологий информационного моделирования (ТИМ) и IT-сервисов в процессы формирования исполнительной документации в строительстве, что способствует значительно-

му сокращению времени и затрат, повышению производительности труда и улучшению общей адаптивности и конкурентоспособности строительных проектов.

В контексте современного строительного производства исполнительная документация (ИД) выступает в качестве фундаментального элемента, обеспечивающего соответствие выполненных работ проектным требованиям, контроль качества и поддержание непрерывности технологических процессов. ИД представляет собой комплекс материалов, фиксирующих фактическое исполнение работ на всех этапах жизненного цикла объекта, включая геодезическую разбивку, монтаж конструкций и ввод в эксплуатацию [5–8].

Статья направлена на системный анализ существующих процессов формирования ИД с акцентом на оценку эффективности применяемых методов, идентификацию ключевых ограничений и источников отклонений, а также определения их воздействия на непрерывность производства и соблюдение сроков реализации проектов. Кроме того, рассматривается потенциал интеграции современных инструментов бережливого строительства, а именно системы *Last Planner System (LPS)* и картирования потока создания ценности – *Value Stream Mapping (VSM)* – для оптимизации указанных процессов.

Оценка эффективности традиционных методов формирования ИД свидетельствует о их ограниченной адаптивности к динамике современных проектов. Классический подход, опирающийся на бумажные носители и ручное ведение журналов (включая общий журнал работ, акты освидетельствования скрытых работ

(АОСР) и исполнительные схемы), характеризуется повышенной трудоемкостью и подверженностью ошибкам.

Согласно аналитическим данным внедрение ТИМ способствует сокращению времени формирования исполнительной документации на 50 %. Кроме того, время согласования снижается в 5–6 раз, а объем документооборота уменьшается до шести раз. Исследования демонстрируют, что применение ТИМ приводит к повышению производительности труда в диапазоне от 75 до 240 % в проектах, поддерживаемых данной технологией, а также обеспечивает экономию до 42 % стандартных затрат за счет сокращения числа изменений и до 67 % по сравнению со стандартной продолжительностью проекта благодаря уменьшению сроков реализации. Кроме того, использование IT-сервисов способствует увеличению эффективности труда на строительных площадках на 49 % и на фабриках на 45 %. Внедрение ТИМ также позволяет сократить сроки проектирования на 10 % и снизить трудозатраты на 10 % [2; 3; 10].

Тем не менее внедрение цифровых инструментов сопряжено с вызовами, такими как интеграция разнородных данных из проектной документации и обеспечение аутентичности электронных подписей, что может снижать общую эффективность на 10–15 % [1; 5; 6; 8].

Идентификация источников ошибок в процессах формирования ИД позволяет выделить ряд критических факторов, препятствующих оптимальному функционированию.

Среди основных ограничений: задержки в составлении актов и схем на этапах скрытых работ (до 30 % случаев обусловлено ожиданием согласований и подписей); расхождения между исполнительными схемами и рабочими чертежами (ошибки в координатах или спецификациях материалов фиксируются в 20 % инцидентов); ручная обработка данных в журналах, приводящая к дублированию информации и ее потере (затраты на корректировку – 10–15 часов на объект).

Источники ошибок преимущественно связаны с человеческим фактором (неполные или некорректные записи – 15–30 %), отсутствием унифицированных шаблонов (25–40 %) и недостаточной интеграцией с системами учета (35 %) [5–7]. Эти аспекты приобретают особую значимость в рамках масштабных объектов, где объем ИД превышает 500 документов, усугубляя риски системных сбоев [5–8].

Влияние несоответствий в ИД на непрерывность производства и сроки реализации объектов носит многогранный характер и поддается количественной оценке. Ошибки инициируют приостановку работ для устранения дефектов, задержки в приемке этапов (до 45 дней) и финансовые убытки (штрафы и простои – 5–10 % от бюджета проекта). В частности, отказ в выдаче заключения о соответствии (ЗОС) вследствие неполноты ИД может удлинить процесс сдачи проекта на 3–6 месяцев, нарушая непрерывность цепочек поставок и координацию бригад. Статистические данные указывают, что 25 % задержек в строительстве напрямую коррелируют с документационными несоответствиями, что, в свою очередь, повышает вероятность аварийных ситуаций на 15 %. Таким образом, несоответствия не только замедляют темпы реализации, но и увеличивают совокупные затраты на 7–12 %, подрывая экономическую устойчивость проектов [4; 5; 7].

В целях оптимизации предлагается интеграция инструментов бережливого строительства. Система *Last Planner System (LPS)* представляет собой коллаборативный подход к планированию, ориентированный на формирование реалистичных графиков посредством вовлечения «последних планировщиков» (бригад и инженеров надзора). В применении к ИД *LPS* обеспечивает еженедельное планирование с использованием визуальных инструментов, таких как Канбан-доски, где фиксируются этапы документооборота, распределение ресурсов и потенциальные риски. Метрика процента выполнения плана (*PPC*) позволяет мониторить своевременную подачу ИД (целевое значение более 80 %). Эмпирические исследования демонстрируют, что применение *LPS* в строительстве сокращает сроки на 20–30 % за счет усиления коммуникации и профилактики отклонений [9].

*Value Stream Mapping (VSM)* служит инструментом визуализации потока создания ценности, позволяющим картографировать весь цикл формирования ИД от инициации задачи до архивации. Процедура включает: определение границ процесса (от получения технического задания до ЗОС); фиксацию ключевых метрик (*Lead Time* – общее время, *Cycle Time* – время обработки, *PCE* – эффективность процесса); идентификацию потерь (ожидание подписей, избыточные итерации). *VSM* способствует сокращению непроизводительных простоев на

40–50 % путем исключения лишних этапов, например, через автоматизацию шаблонов схем. В строительной отрасли *VSM* особенно эффективен для анализа последовательных цепочек, где ошибки в ИД провоцируют каскадные задержки [11].

Сравнительный анализ *LPS* и *VSM* подчеркивает их взаимодополняемость: *VSM* ориентирован на стратегическое картирование потока (идентификация потерь,  $PCE < 30\%$  в традиционных процессах), в то время как *LPS* – на тактический контроль (еженедельный мониторинг, *PPC*). Их интеграция потенциально повышает эффективность ИД на 35–45 %, обес-

печивая устойчивый непрерывный процесс формирования документации. В перспективе это закладывает основу для разработки усовершенствованной модели оптимизации, интегрирующей *BIM*-технологии с принципами *lean construction* [9; 11].

Проведенный анализ подтверждает императив перехода к инструментам бережливого строительства для минимизации источников ошибок в формировании ИД. Внедрение *LPS* и *VSM* позволит нивелировать негативное влияние отклонений и задержек, способствуя повышению общей эффективности строительного производства.

### Список литературы

1. Гилязов, И.Р. Анализ возможностей цифровизации строительного комплекса для совершенствования ведения исполнительной документации / И.Р. Гилязов, А.В. Новоселов // Современное строительство и архитектура. – 2024. – № 2(45).
2. Итоги применения ТИМ в строительной отрасли в 2023 году: какие эффекты оно дало на коммерческих и государственных объектах // Все о стройке.
3. Копылов, А.Д. Цифровизация процессов управления в строительстве / А.Д. Копылов, А.В. Королев, А.В. Батищев // Естественно-гуманитарные исследования. – 2023. – № 2(46). – С. 370–375.
4. Критические риски при некачественной подготовке исполнительной документации // Докитоп.
5. Кузьмина, Т.К. Ведение исполнительной документации в современных условиях и распространённые проблемы / Т.К. Кузьмина, М.В. Сенаторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 4. – С. 338–342.
6. Неровная, Ю.А. Организация контроля исполнительной документации на объектах строительства / Ю.А. Неровная // Наука без границ. – 2020. – № 5(45). – С. 96–106.
7. Орлова, Е.А. Камеральная оценка достоверности строительной исполнительной документации / Е.А. Орлова, А.Х. Байбурин, Н.И. Фомин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2021. – Т. 21. – № 4. – С. 24–31.
8. Синенко, С.А. Совершенствование подготовки исполнительной документации по возведению зданий и сооружений в современных условиях / С.А. Синенко, И.Н. Дорошин, М.А. Гнатусь // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 2(62). – С. 3.
9. Харламова, М.В. Применение Last Planner System для оптимизации строительства / М.В. Харламова, Л.А. Ощерин // Вестник науки. – 2025. – Т. 2. – № 5(86). – С. 1083–1092.
10. Юшкин, И.И. Проблемы и преимущества внедрения BIM на предприятиях строительной отрасли / И.И. Юшкин, Ш.Г.Х. Аламиди, Н.А. Шашевская // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2022. – Т. 18. – № 2. – С. 172–181.
11. Кузнецова, О.Н. Value stream mapping applied to lean construction / О.Н. Кузнецова // Lean Construction Blog.

### References

1. Gilyazov, I.R. Analiz vozmozhnostey tsifrovizatsii stroitel'nogo kompleksa dlya sovershenstvovaniya vedeniya ispolnitel'noy dokumentatsii / I.R. Gilyazov, A.V. Novoselov // Sovremennoye stroitel'stvo i arkhitektura. – 2024. – № 2(45).
2. Itogi primeneniya TIM v stroitel'noy otrasli v 2023 godu: kakiye efekty ono dalo na kommercheskikh i gosudarstvennykh ob"yektakh // Vse o stroyke.

3. Kopylov, A.D. Tsifrovizatsiya protsessov upravleniya v stroitel'stve / A.D. Kopylov, A.V. Korolev, A.V. Batishchev // Yestestvenno-gumanitarnyye issledovaniya. – 2023. – № 2(46). – S. 370–375.
4. Kriticheskiye riski pri nekachestvennoy podgotovke ispolnitel'noy dokumentatsii // Dokitop.
5. Kuz'mina, T.K. Vedeniye ispolnitel'noy dokumentatsii v sovremennykh usloviyakh i rasprostranonnyye problemy / T.K. Kuz'mina, M.V. Senatorov // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. – 2021. – № 4. – S. 338–342.
6. Nerovnaya, YU.A. Organizatsiya kontrolya ispolnitel'noy dokumentatsii na ob"yektakh stroitel'stva / YU.A. Nerovnaya // Nauka bez granits. – 2020. – № 5(45). – S. 96–106.
7. Orlova, Ye.A. Kameral'naya otsenka dostovernosti stroitel'noy ispolnitel'noy dokumentatsii / Ye.A. Orlova, A.KH. Bayburin, N.I. Fomin // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura. – 2021. – T. 21. – № 4. – S. 24–31.
8. Sinenko, S.A. Sovershenstvovaniye podgotovki ispolnitel'noy dokumentatsii po vozvedeniyu zdaniy i sooruzheniy v sovremennykh usloviyakh / S.A. Sinenko, I.N. Doroshin, M.A. Gnatus' // Inzhenernyy vestnik Dona. – 2020. – № 2(62). – S. 3.
9. Kharlamova, M.V. Primeneniye Last Planner System dlya optimizatsii stroitel'stva / M.V. Kharlamova, L.A. Oshcherin // Vestnik nauki. – 2025. – T. 2. – № 5(86). – S. 1083–1092.
10. Yushkin, I.I. Problemy i preimushchestva vnedreniya BIM na predpriyatiyakh stroitel'noy otrasli / I.I. Yushkin, SH.G.KH. Alamidi, N.A. Stashevskaya // Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy. – 2022. – T. 18. – № 2. – S. 172–181.
11. Kuznetsova, O.N. Value stream mapping applied to lean construction / O.N. Kuznetsova // Lean Construction Blog.

---

© М.Н. Белая, А.А. Гаар, 2026

УДК 004.415.2

В.Г. ПЕСТЕРЕВ, В.А. ХАРАХИНОВ

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский  
технический университет», г. Иркутск

## МЕТОДОЛОГИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ИТ-ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ DEVOPS: АРХИТЕКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И АДАПТИВНАЯ МОДЕЛЬ ВНЕДРЕНИЯ

*Ключевые слова:* автоматизация; архитектурная модель; жизненный цикл ПО; ИТ-инфраструктура; контейнеризация; наблюдаемость; *CI/CD*; *DevOps*.

*Аннотация.* В работе исследуется проблема повышения эффективности жизненного цикла программного обеспечения в условиях динамичной цифровой трансформации. Рассматривается методология *DevOps* как комплексный подход к интеграции процессов разработки и эксплуатации. Цель исследования – разработка адаптивной архитектурной модели автоматизации ИТ-инфраструктуры, основанной на принципах *DevOps*. Предложен метод ограниченной декомпозиции этапов внедрения, заключающийся в выделении двух контуров автоматизации: базового и расширенного. Для каждого контура формализованы ключевые компоненты, критерии эффективности и риски. Проведен сравнительный анализ архитектурных вариантов развертывания на основе многокритериальной оценки. Разработанная модель проиллюстрирована на практическом сценарии внедрения для типовой веб-системы. Результаты исследования показывают, что предложенная двухуровневая модель позволяет достичь статистически значимого сокращения времени цикла изменений на 65–80 % и снижения доли проблемных релизов на 40–60 % при сохранении управляемой эксплуатационной сложности.

являет повышенные требования к скорости, надежности и безопасности модификации программных систем. Традиционная модель с изолированными циклами разработки и эксплуатации становится источником высоких транзакционных издержек, увеличения времени вывода изменений на рынок (*Time-to-Market*) и роста операционных рисков [1; 2]. В этих условиях методология *DevOps*, синтезирующая культурные практики, технические методы и инструменты автоматизации, формирует новую архитектурную парадигму управления жизненным циклом программного обеспечения (ПО) [3; 4].

Ядро *DevOps* составляют принципы непрерывной интеграции и поставки (*CI/CD*), инфраструктура как код (*IaC*), стандартизация сред через контейнеризацию, всесторонняя наблюдаемость (*Observability*) и встраивание требований безопасности (*DevSecOps*) [5]. Внедрение этих практик позволяет организациям перейти от дискретных, редких релизов к непрерывному потоку изменений с высокой степенью предсказуемости [6].

Однако проектирование *DevOps*-инфраструктуры представляет собой *NP*-сложную задачу, требующую баланса между степенью автоматизации, эксплуатационной надежностью, безопасностью и ограниченными ресурсами – кадровыми, финансовыми и вычислительными [7; 8]. Значительная часть существующих исследований ориентирована на сценарии крупных корпораций с доступом к зрелым процессам и дорогостоящим платформам. Вопросы адаптации архитектурных принципов *DevOps* для средних проектов, характеризующихся необходимостью минимизации сложности и зави-

### Введение

Эволюция цифровой экономики предъ-

Таблица 1. Матрица сравнительного анализа архитектурных вариантов развертывания

Критерий ( $K_i$ )	A1: Ручное развертывание	A2: <i>Docker Compose</i>	A3: Оркестрация ( <i>Kubernetes</i> )	Интерпретация для средних проектов
$K_1$ : Стоимость внедрения	5	4	2	A1 имеет низкий порог входа, но генерирует скрытые эксплуатационные затраты
$K_2$ : Стоимость владения	3	4	3	A2 обеспечивает оптимальный баланс затрат и управляемости для команд до десяти человек
$K_3$ : Воспроизводимость	1	4	5	Контейнеризация (A2, A3) кардинально повышает детерминированность развертывания
$K_4$ : Управляемость отката	2	4	5	Версионирование образов в A2/A3 позволяет реализовать быстрый и надежный откат
$K_5$ : Безопасность (секреты)	1	4	5	A2 позволяет внедрить дисциплинированное управление секретами вне репозитория
$K_6$ : Наблюдаемость	2	4	5	Оркестраторы предоставляют встроенные механизмы сбора метрик и логов (A3)
$K_7$ : Требования к компетенциям	4	3	2	A3 требует наличия выделенной экспертизы в области оркестрации и сетей
$K_8$ : Масштабируемость	1	3	5	A3 обеспечивает эластичное горизонтальное масштабирование, необходимое для высоких нагрузок
$K_9$ : Риск ручных вмешательств	1	3	4	Версионирование и стандартизация в A2/A3 минимизируют «дрейф» конфигураций
Суммарный балл	20	34	36	

симостей, освещены недостаточно [9].

Целью данного исследования является разработка формализованной адаптивной модели автоматизации ИТ-инфраструктуры на основе методологии *DevOps*. Модель должна обеспечивать следующее.

1. Поэтапное внедрение с измеримыми результатами на каждом уровне.

2. Минимизацию эксплуатационных рисков и конфигурационного дрейфа.

3. Управляемый баланс между автоматизацией, безопасностью и сложностью сопровождения.

#### Методология исследования

Исследование выполнено на основе комплексного дизайна, включающего следующие методы.

1. Систематический обзор литературы: анализ публикаций в базах данных *IEEE Xplore*, *ACM Digital Library*, *Scopus*, *Web of Science* за период 2020–2024 гг. по ключевым запросам: «*DevOps infrastructure architecture*», «*CI/CD pipeline design*», «*DevSecOps adoption models*», «*containerization for SMEs*».

2. Формализация архитектурных принципов: выделение инвариантных (инструментально-независимых) принципов проектирования *DevOps*-инфраструктуры.

3. Сравнительный архитектурный анализ: оценка трех альтернативных вариантов развертывания (A1 – ручное, A2 – контейнеризованное на базе *Docker Compose*, A3 – оркестрируемое на базе *Kubernetes*) по фиксированной системе критериев  $K_i$  с использованием экспертно-аналитической шкалы от 1 до 5.

4. Архитектурное моделирование: разра-

ботка двухуровневой логической модели инфраструктуры (базовый и расширенный контуры) и модели развертывания.

5. Верификация на прикладном сценарии: анализ эффекта от внедрения базового контура на примере типового веб-приложения с измерением ключевых показателей до и после автоматизации.

Система критериев для сравнительного анализа  $K$  включает: стоимость внедрения ( $K_1$ ), стоимость владения ( $K_2$ ), воспроизводимость ( $K_3$ ), управляемость отката ( $K_4$ ), безопасность управления секретами ( $K_5$ ), наблюдаемость ( $K_6$ ), требования к компетенциям ( $K_7$ ), масштабируемость ( $K_8$ ), риск ручных вмешательств ( $K_9$ ).

### Анализ архитектурных принципов и сравнительная оценка вариантов

На основе обзора литературы формализованы шесть инвариантных архитектурных принципов *DevOps*-инфраструктуры.

1. Управляемость изменений: все модификации кода, конфигураций и инфраструктуры должны быть трассируемыми и воспроизводимыми из единого версионизируемого источника.

2. Воспроизводимость сред: согласованность сред разработки, тестирования и эксплуатации на уровне конфигурации и процедур обновления.

3. Автоматизация критического контура: автоматизация полного пути поставки изменений: сборка → верификация → формирование артефакта → развертывание → пост-деплойная проверка → откат.

4. Наблюдаемость: наличие минимально достаточного набора метрик, логов и трейсов для подтверждения успешности релиза, проактивного выявления аномалий и сокращения времени диагностики.

5. Встроенная безопасность (*DevSecOps*): интеграция практик управления секретами, проверки уязвимостей и разграничения доступа непосредственно в конвейер поставки.

6. Восстановимость: наличие штатных процедур отката прикладных компонентов и отдельного, проверяемого контура резервного копирования состояния данных.

Сравнительный анализ трех архитектурных вариантов ( $A1$ ,  $A2$ ,  $A3$ ) по девяти критериям  $K_1$ – $K_9$  представлен в табл. 1. Оценка проводилась по пятибалльной шкале, где 5 – наилучшее значение.

Вывод: для большинства проектов средней сложности вариант  $A2$  (контейнеризация на базе *Docker Compose*) является архитектурно-рациональным, обеспечивая значительный прирост по критериям воспроизводимости, безопасности и управляемости ( $\sum K_{A2} = 34$ ) при умеренном росте требований к компетенциям. Вариант  $A3$  оправдан при наличии требований к высокой доступности, эластичному масштабированию и соответствующей экспертизе.

### Двухуровневая адаптивная модель *DevOps*-инфраструктуры

На основе проведенного анализа предложена двухуровневая модель (рис. 1).

Уровень 1. Базовый контур автоматизации ( $L_1$ ).

Цель – обеспечить управляемость изменений, воспроизводимость развертываний, предсказуемый откат и базовую наблюдаемость при минимальной эксплуатационной сложности.

Обязательные компоненты.

1. Система контроля версий (*Git*) как единый источник истины.

2. Контейнеризация прикладных компонентов (*Docker*).

3. Описание многоконтейнерного развертывания (*Docker Compose*).

4. Простейший *CI/CD*-конвейер для сборки образа и деплоя.

5. Выделенное хранилище для данных (*volumes*) и секретов (*environment files*).

6. Базовый мониторинг: метрики хоста (*CPU*, *RAM*, диск), доступность сервиса (*HTTP*), логи приложения.

7. Регламентированный процесс резервного копирования и проверки восстановления данных.

Уровень 2. Расширенный контур ( $L_2$ ).

Цель – повысить надежность, безопасность и управляемость при росте нагрузки, критичности сервиса или команды.

Добавляемые компоненты и практики.

1. Оркестрация контейнеров (*Kubernetes*) для повышения отказоустойчивости и масштабируемости.

2. Продвинутый *CI/CD*-конвейер с этапами статического/динамического анализа безопасности, тестирования уязвимостей образов.

3. Инфраструктура как код (*Terraform*, *Ansible*) для управления облачными ресурсами и конфигурацией.

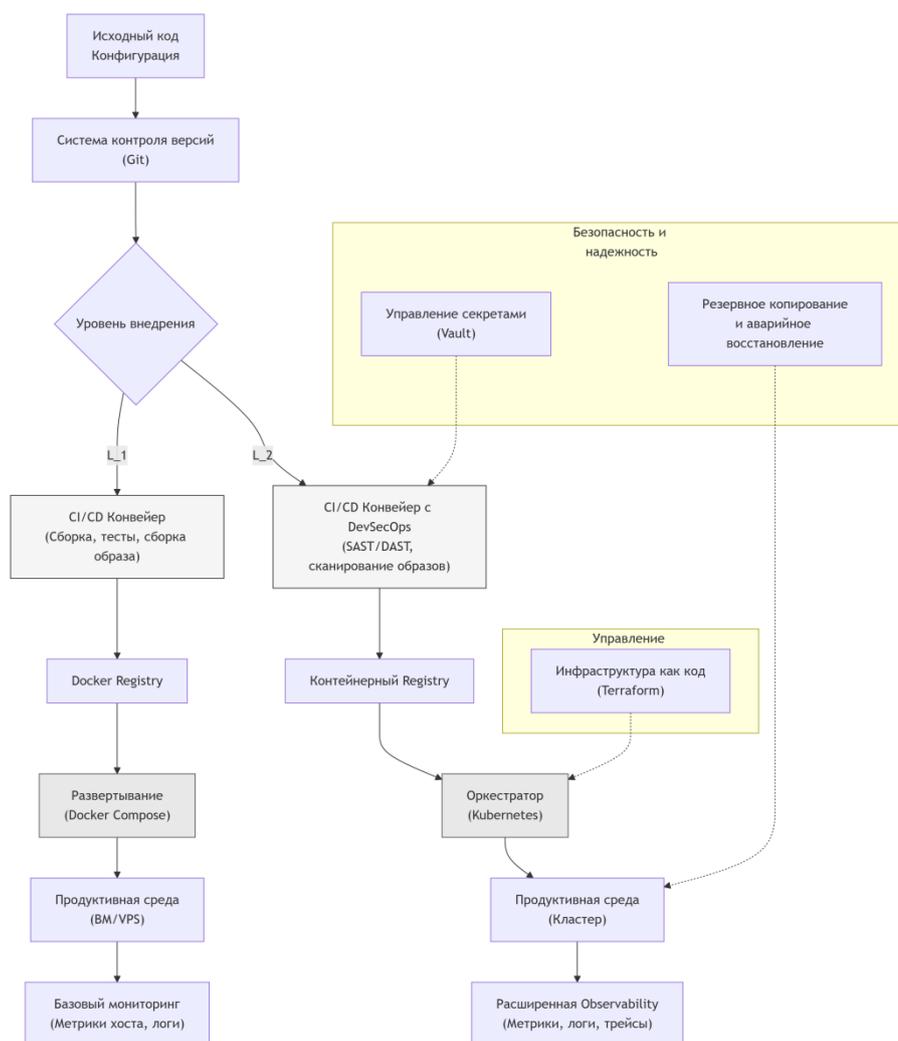


Рис. 1. Двухуровневая архитектурная модель DevOps-инфраструктуры

4. Расширенная наблюдаемость: централизованный сбор логов (EFK/ELK-стек), метрики приложения (APM), распределенная трассировка.

5. Политики безопасности: сетевые политики (Network Policies), контроль доступа на основе ролей (RBAC), регулярный аудит.

**Прикладной сценарий и оценка эффективности**

Для верификации модели рассмотрен сценарий внедрения базового контура  $L_1$  для типового веб-приложения (интернет-магазин на CMS), ранее развертываемого вручную на VPS.

Исходное состояние: ручные операции по SSH, прямое редактирование файлов на сервере, неформализованный процесс обновлений, отсутствие метрик доступности, нерегулярное резервное копирование.

Реализация базового контура  $L_1$ .

1. Приложение и зависимости описаны в виде Docker-образов.
2. Состояние (база данных, файлы) вынесено в named volumes.
3. Создан Git-репозиторий с Dockerfile, docker-compose.yml и конфигурациями.
4. Настроен CI/CD-пайплайн (на базе GitLab CI), выполняющий сборку образа, его отправку в приватный registry и развертыва-

Таблица 2. Сравнительные показатели эффективности до и после внедрения базового контура  $L_1$ 

Показатель	До внедрения (ручной процесс)	После внедрения базового контура $L_1$	Метод измерения
Время цикла изменений (от коммита до продакшена)	4–24 часа, высокая вариативность	15–30 минут, стабильно	Среднее время по журналу деплоев за квартал
Частота релизов	2–3 в месяц	10–15 в месяц	Количество успешных деплоев в продуктив за месяц
Доля проблемных релизов (требовавших отката)	~25 %	~8 %	Отношение количества откатов к общему числу релизов
Среднее время восстановления ( $MTTR$ ) при инциденте	120–180 минут	20–40 минут	Время от фиксации инцидента до восстановления сервиса
Дрейф конфигурационный	Высокий, частые расхождения между средами	Минимальный, конфигурация версионирована	Результаты периодического аудита конфигураций
Наблюдаемость системы	Отсутствие метрик, реактивное реагирование	Базовые метрики и алертинг, проактивный мониторинг	Наличие и использование дашбордов мониторинга

ние на целевом сервере через *docker-compose pull/up*.

5. Настроен базовый мониторинг доступности эндпоинтов и основных метрик хоста.

6. Внедрен автоматизированный контур резервного копирования баз данных (БД) и файлов с еженедельной проверкой восстановления.

Количественные результаты внедрения отражены в табл. 2.

Полученные данные демонстрируют статистически значимое улучшение ключевых метрик: сокращение времени цикла на 85–90 %, увеличение частоты релизов в 3–5 раз, снижение доли проблемных релизов на 68 %, сокращение  $MTTR$  на 75–85 %.

### Обсуждение результатов и заключение

Проведенное исследование позволило формализовать архитектурные принципы *DevOps* и предложить адаптивную двухуровневую модель внедрения ( $L_1$ ,  $L_2$ ). Ключевым научным результатом является метод ограниченной декомпозиции этапов автоматизации, позволяющий минимизировать риски организационного срыва и получать измеримую отдачу на каж-

дом шаге.

Сравнительный анализ показал, что для широкого класса проектов средней сложности вариант  $A2$  (*Docker Compose*) является архитектурно-рациональным, обеспечивая существенный прирост по критериям воспроизводимости, безопасности и управляемости ( $\Sigma K_{A2} = 34$ ) при умеренном росте требований к компетенциям. Переход к варианту  $A3$  (оркестрация) должен быть экономически и технологически обоснован.

Предложенная модель решает выявленную в литературе проблему избыточной сложности начального внедрения *DevOps*. Фокус на воспроизводимости, версионировании артефактов и разделении данных/кода позволяет построить устойчивый контур поставки изменений без зависимости от дорогостоящих корпоративных платформ.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на следующее.

1. Разработку формальной математической модели для оптимизации выбора инструментов и архитектуры на основе многокритериального анализа.

2. Исследование влияния различных паттернов *CI/CD*-пайплайнов на итоговую надеж-

ность системы.

3. Создание онтологической модели компетенций, необходимых для поддержки разных уровней *DevOps*-зрелости.

### Заключение

Архитектура *DevOps*-инфраструктуры должна проектироваться как адаптивная система, способная эволюционировать вместе с ростом требований к продукту и команде.

Предложенная в работе двухуровневая модель, основанная на принципах управляемости изменений, воспроизводимости и встроенной безопасности, предоставляет практический фундамент для такой эволюции. Результаты внедрения базового контура  $L_1$  подтверждают его эффективность в достижении значительного улучшения ключевых показателей жизненного цикла ПО, что способствует повышению общей конкурентоспособности предприятия в цифровой среде.

### Список литературы

1. Leite, L. Обзор концепций и проблем DevOps / L. Leite, C. Rocha, F. Kon, D. Milojicic, P. Meirelles // ACM Computing Surveys. – 2019. – Vol. 52. – No. 6. – P. 1–35.
2. Ebert, C. DevOps / C. Ebert, G. Gallardo, J. Hernantes, N. Serrano // IEEE Software. – 2016. – Vol. 33. – No. 3. – P. 94–100.
3. Jabbari, R. Что такое DevOps? Систематическое картографическое исследование определений и практик / R. Jabbari, N. bin Ali, K. Petersen, B. Tanveer // Труды научного семинара XP2016. – 2016. – С. 1–11.
4. Wiedemann, A. DevOps и его будущее / A. Wiedemann, M. Wiesche, H. Gewalt, H. Krcmar // Труды 52-й Гавайской международной конференции по системным наукам. – 2019. – С. 1–10.
5. Myrbakken, H. DevSecOps: многоголосый обзор литературы / H. Myrbakken, R. Colomo-Palacios // Труды Международной конференции по улучшению программных процессов и определению возможностей. – 2017. – С. 17–29.
6. Fitzgerald, B. Непрерывная инженерия программного обеспечения: дорожная карта и повестка дня / B. Fitzgerald, K. Stol // Journal of Systems and Software. – 2017. – Т. 123. – С. 176–189.
7. Senapathi, M. Возможности, практики и проблемы DevOps: исследование на примере / M. Senapathi, J. Buchan, H. Osman // Труды 22-й международной конференции по оценке и оценке в программной инженерии. – 2018. – С. 57–67.
8. Debois, P. DevOps: начало революции в программном обеспечении? / P. Debois // Cutter Business Technology Journal. – 2011. – Т. 24. – № 8. – С. 3–5.
9. Sanjeetha, M.B.F. Разработка модели согласования для внедрения DevOps в малых и средних предприятиях: разведочное исследование / M.B.F. Sanjeetha, et al. // IEEE Access. – 2023. – Т. 11. – С. 144213–144225.
10. Riungu-Kalliosaari, L. Преимущества и проблемы внедрения DevOps на практике: пример использования / L. Riungu-Kalliosaari, et al. // Труды конференции по улучшению программных процессов, ориентированному на продукт. – 2016. – С. 590–597.

### References

3. Jabbari, R. Chto takoye DevOps? Sistematiceskoye kartograficheskoye issledovaniye opredeleniy i praktik / R. Jabbari, N. bin Ali, K. Petersen, B. Tanveer // Trudy nauchnogo seminarax XP2016. – 2016. – S. 1–11.
4. Wiedemann, A. DevOps i yego budushcheye / A. Wiedemann, M. Wiesche, H. Gewalt, H. Krcmar // Trudy 52-y Gavayskoy mezhdunarodnoy konferentsii po sistemnym naukam. – 2019. – S. 1–10.
5. Myrbakken, H. DevSecOps: mnogogolosyy obzor literatury / H. Myrbakken, R. Colomo-Palacios // Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii po uluchsheniyu programmnykh protsessov i opredeleniyu vozmozhnostey. – 2017. – S. 17–29.
6. Fitzgerald, B. Nepreryvnaya inzheneriya programmnoy obespecheniya: dorozhnaya karta i povestka dnya / B. Fitzgerald, K. Stol // Journal of Systems and Software. – 2017. – T. 123. –

S. 176–189.

7. Senapathi, M. Vozmozhnosti, praktiki i problemy DevOps: issledovaniye na primere / M. Senapathi, J. Buchan, H. Osman // Trudy 22-y mezhdunarodnoy konferentsii po otsenke i otsenke v programmnoy inzhenerii. – 2018. – S. 57–67.

8. Debois, P. DevOps: nachalo revolyutsii v programmnom obespechenii? / P. Debois // Cutter Business Technology Journal. – 2011. – T. 24. – № 8. – S. 3–5.

9. Sanjeetha, M.B.F. Razrabotka modeli soglasovaniya dlya vnedreniya DevOps v malykh i srednikh predpriyatiyakh: razvedochnoye issledovaniye / M.B.F. Sanjeetha, et al. // IEEE Access. – 2023. – T. 11. – S. 144213–144225.

10. Riungu-Kalliosaari, L. Preimushchestva i problemy vnedreniya DevOps na praktike: primer ispol'zovaniya / L. Riungu-Kalliosaari, et al. // Trudy konferentsii po uluchsheniyu programmnykh protsessov, oriyentirovannomu na produkt. – 2016. – S. 590–597.

---

© В.Г. Пестерев, В.А. Харахинов, 2026

УДК 658.5

Ю.А. ТРОФИМОВА, О.Л. ПЕРЕРВА

*Филиал ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Калуга*

## ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ КАК ИНСТРУМЕНТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

*Ключевые слова:* контроль качества; оптимизация производства; производственные процессы; производственная эффективность; промышленное производство; цифровизация; цифровые двойники.

*Аннотация.* Целью написания статьи является исследование цифровых двойников как инновационного инструмента совершенствования промышленных производств в условиях цифровой трансформации экономики. Задача настоящей статьи состоит в том, чтобы проанализировать практическое применение технологии цифровых двойников для оптимизации производственных процессов, повышения эффективности и контроля качества продукции. Гипотеза исследования заключается в том, что внедрение цифровых двойников способствует значительному улучшению производственных показателей и конкурентоспособности промышленных предприятий. В ходе исследования использованы теоретические методы: анализ научной литературы, обобщение практического опыта внедрения цифровых двойников в различных отраслях промышленности, систематизация данных о применении технологии в производственных процессах. В результате исследования были выявлены ключевые преимущества использования цифровых двойников в промышленности, определены основные направления их применения, а также выявлены проблемы и перспективы дальнейшего развития данной технологии.

Стремительное распространение цифровых технологий и растущие запросы на повышение эффективности производства формируют условия, в которых предприятия вынуждены переходить к новым методам управления и оптими-

зации процессов. Одним из наиболее значимых инструментов такого перехода становятся цифровые двойники – виртуальные модели реальных объектов, создаваемые на основе данных, собираемых в режиме реального времени.

Сущность концепции цифрового двойника заключается в построении виртуального аналога физической системы, позволяющего отслеживать ее состояние, моделировать поведение и прогнозировать результаты работы. Данное исследование является актуальным, поскольку благодаря использованию Интернета вещей, искусственного интеллекта и машинного обучения цифровые двойники открывают новые горизонты в понимании того, как работают и насколько эффективны производственные процессы. В совокупности они позволяют перенести ключевые производственные функции в цифровую среду, что дает предприятиям дополнительные инструменты для управления качеством, ресурсами и техническим состоянием оборудования [6].

Практическая значимость цифровых двойников заключается в их способности обеспечивать более глубокое понимание характеристик производственных процессов и выявлять возможные проблемы до того, как они приведут к сбоям или простоям. Благодаря визуализации и непрерывному мониторингу сложных систем цифровые двойники облегчают процесс принятия решений и повышают точность планирования.

Одним из наиболее востребованных направлений применения цифровых двойников являются виртуальное проектирование и моделирование новых изделий. Возможность анализировать характеристики будущего продукта без необходимости создания физического образца радикально меняет процесс разработки.

Переход от традиционного прототипирова-

ния к цифровому сокращает длительные и затратные этапы производства нескольких тестовых вариантов. Виртуальная среда позволяет многократно модифицировать конструкцию изделия, сравнивать различные инженерные решения и исключать ошибки на самых ранних этапах проектирования. Это существенно ускоряет вывод продукта на рынок и снижает расходы на производство опытных образцов [11].

Подобная стратегия особенно востребована в автомобильной и аэрокосмической промышленности – отраслях, в которых ошибка в конструкции может иметь критические последствия. Такие компании, как *Tesla* и *Ford*, используют эту технологию для создания виртуальных прототипов, что позволяет им оптимизировать характеристики транспортных средств и их безопасность еще до создания каких-либо материальных объектов. Аналогичным образом в аэрокосмической отрасли используются цифровые двойники для моделирования и доработки конструкций самолетов. Компания *Boeing* применяет цифровые двойники для улучшения конструкции и технического обслуживания своих самолетов, обеспечения высоких стандартов качества и снижения эксплуатационных расходов [9].

Экономическая выгода от внедрения виртуального прототипирования проявляется как через снижение затрат, так и за счет ускорения производственного цикла. Оптимизация материалов, выбор наилучших технологических решений и минимизация ошибок приводят к ощутимому снижению стоимости разработки и эксплуатации продукта.

Цифровые двойники активно используются для создания подробных моделей производственных линий. Благодаря им предприятие может заранее определить узкие места, спрогнозировать влияние различных факторов на выпуск продукции и сформировать оптимальные технологические цепочки.

Такой подход позволяет заблаговременно корректировать технологию, избегая простоя оборудования и непредвиденных затрат. Моделирование различных сценариев работы производственной линии помогает определить наиболее рациональный порядок операций и оптимальное распределение ресурсов. Это особенно важно для предприятий с высокой степенью сложности производственных процессов, где небольшие отклонения могут привести к значительным потерям.

Использование цифровых двойников в производственных системах позволяет:

- выявлять и устранять потенциальные неисправности оборудования;
- оптимизировать загрузку рабочих мест и логистику;
- оценивать последствия изменений в технологическом процессе;
- снижать уровень брака за счет стабильной настройки параметров [2].

Примерами успешного применения являются компании *General Electric* и *Siemens*. *General Electric* продемонстрировала, как цифровые двойники помогли оптимизировать процесс производства реактивных двигателей. Смоделировав производственную линию, компания смогла сократить время производства на 25 % и затраты на 10 %. Бренд *Siemens* использовал цифровых двойников для улучшения процессов производства электроники. Благодаря моделированию производственных сценариев компания смогла улучшить планирование и распределение ресурсов, что привело к увеличению производительности на 20 % и значительному снижению эксплуатационных расходов [8].

Постоянный сбор данных с оборудования позволяет цифровым двойникам воспроизводить динамическое поведение объектов. Анализ температуры, вибрации, давления и других параметров в режиме реального времени обеспечивает своевременное выявление аномалий и прогнозирование возможных неисправностей [4].

Одним из ключевых преимуществ данного подхода является возможность перехода к предиктивному обслуживанию, когда ремонт выполняется не по графику, а по фактическому состоянию оборудования. Это позволяет снизить вероятность отказов, минимизировать простои и продлить срок службы техники.

В автомобилестроении цифровые двойники используются для оценки износа роботизированных механизмов сборочных линий. В энергетике – для мониторинга ветрогенераторов и газовых турбин. В аэрокосмической отрасли – для контроля состояния реактивных двигателей. Благодаря такой практике предприятия повышают надежность оборудования и существенно экономят на ремонте [1].

Кроме того, использование цифровых двойников способствует улучшению качества выпускаемой продукции, поскольку оборудование

работает в стабильных оптимальных режимах, что минимизирует вероятность появления дефектов.

Технология цифровых двойников позволяет осуществлять многоуровневый контроль качества на всех этапах производственного процесса. Она обеспечивает:

- раннее выявление дефектов;
- отслеживание отклонений от нормативов;
- формирование подробной документации для аудита;
- автоматизированное сравнение фактических данных с установленными стандартами.

Алгоритмы машинного обучения позволяют анализировать большие массивы исторических данных, выявлять закономерности и прогнозировать появление дефектов. Благодаря этому предприятие может заранее вносить корректировки в процесс производства и предотвращать выпуск некачественной продукции [5].

Реальные примеры демонстрируют значимость цифровых двойников для контроля качества. В аэрокосмической отрасли компания *Rolls-Royce* использовала технологию цифровых двойников для оптимизации производительности и технического обслуживания своих авиационных двигателей. Создав виртуальную копию каждого двигателя, компания смогла отслеживать данные в режиме реального времени, прогнозировать возможные неисправности и проводить профилактическое техническое обслуживание. Это не только сократило время простоя, но и повысило надежность и экономичность двигателей. В результате *Rolls-Royce* сообщила о значительном снижении затрат на техническое обслуживание и повышение удовлетворенности клиентов.

Аналогичным образом *General Electric* использовала цифровые двойники в своем подразделении по производству электроэнергии. Компания разработала цифровые двойники своих газовых турбин для моделирования различных условий эксплуатации и оптимизации производительности. Этот подход позволил предвидеть проблемы до их возникновения, что позволило своевременно принять меры. Технология цифровых двойников позволила сократить количество сбоев в работе и повысить эффективность выработки электроэнергии почти на 20 %, продемонстрировав существенное влияние на производительность и контроль качества [8].

В автомобилестроении компания *BMW*

внедряла цифровые двойники в свои производственные линии для оптимизации производственных процессов. Создавая цифровые копии сборочных линий, они моделировали различные производственные сценарии и выявляли узкие места. Такого рода анализ позволил *BMW* повысить эффективность рабочего процесса, сократить время производства и обеспечить более высокую точность изготовления. В результате эффективность на производственной линии компании увеличилась на 25 %, а количество дефектов значительно сократилось.

Наконец, в фармацевтической промышленности компания *Pfizer* внедрила технологию цифровых двойников для улучшения производства сложных биологических препаратов. Благодаря постоянному наблюдению и моделированию производственного процесса они смогли оптимизировать условия и предвидеть любые отклонения. Это позволило повысить качество продукции, отвечающей строгим нормативным стандартам. Внедрение цифровых двойников обеспечило *Pfizer* конкурентное преимущество в более эффективном производстве высококачественных фармацевтических препаратов [7].

Несмотря на значительный потенциал, внедрение цифровых двойников сталкивается с рядом сложностей.

### 1. Высокие финансовые затраты.

Создание цифровых двойников требует значительных финансовых ресурсов для приобретения современных датчиков, программного обеспечения и высокопроизводительной вычислительной инфраструктуры. Подобные первоначальные затраты могут быть непомерно высокими, особенно для малых и средних предприятий. Для облегчения ситуации целесообразно рассмотреть возможность поэтапного внедрения, начиная с критических областей и постепенно расширяя сферу применения по мере того, как становятся очевидными ощутимые преимущества.

### 2. Проблемы интеграции данных.

Цифровые двойники используют огромные объемы данных из различных источников, включая устройства Интернета вещей, корпоративные системы и устаревшее оборудование. Обеспечение бесперебойной интеграции данных из этих источников требует надежных стратегий управления данными и стандартов совместимости. Производителям следует инвестировать в масштабируемые платформы обра-

ботки данных и системы управления данными, которые могут эффективно согласовывать и обрабатывать эту информацию.

### 3. Киберугрозы.

Поскольку цифровые двойники предполагают обширный обмен данными и наблюдение в режиме реального времени, возникает опасность киберугроз. Защита конфиденциальных оперативных данных и поддержание целостности цифровых двойников требуют строгих мер кибербезопасности. Внедрение многоуровневых протоколов безопасности, регулярная оценка уязвимостей и обучение сотрудников безопасному поведению в цифровом пространстве являются важными шагами для защиты технологии.

### 4. Дефицит квалифицированных специалистов.

Для успешного внедрения цифровых двойников требуется квалифицированный персонал, разбирающийся в таких областях, как обработка данных, искусственный интеллект, машинное обучение и программная инженерия. Нехватка таких специалистов может сильно затруднить процесс внедрения. Производителям следует инвестировать в повышение квалификации своих сотрудников с помощью целевых программ обучения и рассмотреть возможность сотрудничества с высшими учебными заведениями для устранения дефицита кадров [3].

Эффективная реализация технологии требует разработанной стратегии, включающей экономическую оценку, постановку целей, планирование этапов внедрения и постоянную оценку результатов.

Будущее цифровых двойников связано с интеграцией искусственного интеллекта, машинного обучения, технологий дополненной и

виртуальной реальности. Эти инструменты позволят сделать взаимодействие пользователя с цифровыми моделями более наглядным и интерактивным, что упростит процессы диагностики, обучения персонала и принятия решений.

Внедрение средств виртуальной реальности и дополненной реальности позволит по-новому проектировать рабочие пространства, визуализировать сложные процессы и ускорять обучение сотрудников. Параллельно расширяются возможности аналитики больших данных, что делает цифровые двойники не только зеркальным отображением физического объекта, но и самостоятельным инструментом для оптимизации процессов и прогнозирования.

Развитие высокопроизводительных вычислительных систем также будет способствовать повышению точности и скорости работы цифровых двойников, что сделает технологию доступнее и эффективнее [10].

Цифровые двойники постепенно становятся одним из ключевых инструментов цифровизации промышленности. Их применение позволяет предприятиям ускорять разработку продукции, улучшать технологические процессы, оптимизировать обслуживание оборудования и повышать уровень контроля качества.

Несмотря на существующие барьеры (высокие затраты, сложности интеграции, риски киберугроз и нехватку квалифицированных кадров), потенциал технологии остается чрезвычайно высоким. Дальнейшее развитие искусственного интеллекта, виртуальной реальности и аналитических инструментов будет способствовать еще более широкому внедрению цифровых двойников и формированию интеллектуальных производственных систем нового поколения.

## Список литературы

1. Correia, J.B. Data management in digital twins: a systematic literature review / J.B. Correia, M. Abel, K. Becker // *Knowledge and Information Systems*. – 2023. – Vol. 65. – P. 3165–3196.
2. Eriksson, K. Quality assurance of digital twins / K. Eriksson, C. Markussen // *42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. – 2023. – Vol. 1.
3. Grieves, M. Digital twin certified: employing virtual testing of digital twins in manufacturing to ensure quality products / M. Grieves // *Machines*. – 2023. – Vol. 11. – No. 8.
4. Industry IoT Consortium. Optimizing manufacturing processing and quality management with digital twins, IIoT // *Control Engineering*. – 2021.
5. Jaensch, F. Digital twins of manufacturing systems as a base for machine learning / F. Jaensch, A. Csizar, C. Scheifele, A. Verl // *25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*. – 2018.
6. Makinen, R. The role of digital twins in improving business processes and quality management /

R. Makinen // National Journal of Quality, Innovation, and Business Excellence. – 2024. – Vol. 1. – No. 2. – P. 23–29.

7. Rodionov, N. Digital twin technology as a modern approach to quality management / N. Rodionov, L. Tatarnikova // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 284.

8. Segovia, M. Design, modeling and implementation of digital twins / M. Segovia, J. Garcia-Alfaro // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – No. 14.

9. Wagner, R. Challenges and potentials of digital twins and Industry 4.0 in product design and production for high performance products / R. Wagner, B. Schleich, B. Haefner, A. Kuhnle, S. Wartzack, G. Lanza // Procedia CIRP. – 2019. – Vol. 84. – P. 88–93.

10. Xu, H. A survey on digital twin for industrial Internet of Things: applications, technologies and tools / H. Xu, J. Wu, Q. Pan, X. Guan, M. Guizani // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2023. – Vol. 25. – No. 4. – P. 2569–2598.

11. Zhu, X. A digital twin-driven method for online quality control in process industry / X. Zhu, Y. Ji // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 119. – P. 3045–3064.

12. Трофимова, Ю.А. Внедрение технологии робастного проектирования в систему качества промышленных предприятий / Ю.А. Трофимова, О.Л. Перерва // Глобальный научный потенциал. – 2025. – № 6(171). – С. 374–379.

### References

12. Trofimova YU.A. Vnedreniye tekhnologii nadezhnogo proyektirovaniya v sistemu kachestva promyshlennykh predpriyatiy / YU.A. Trofimova O.L. Breyk // Global'nyu nauchnyy potentsial. – 2025. – № 6(171). – S. 374–379.

---

© Ю.А. Трофимова, О.Л. Перерва, 2026

УДК 608

Н.А. ГОЛУБЕВ<sup>1</sup>, И.А. ЛОСКУТОВ<sup>2</sup>, Д.А. СКВОРЦОВА<sup>1</sup><sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет

имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва

## МЕТОДЫ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ ДАНЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ И КЛАССИФИКАЦИИ СОСТАВА ЛОКАЛЬНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

*Ключевые слова:* гамма-спектрометрия; коллимация; комптоновское рассеяние; ослабление излучения; сцинтилляционные детекторы; фотоэффект, энергетический спектр; эффективный атомный номер.

*Аннотация.* Цель работы – оценить применимость спектрометрии ослабления внешнего фотонного излучения для классификации состава локальных включений по изменению энергетического спектра. Задачами статьи являются обоснование информативных спектральных признаков, определение требований к источнику, геометрии измерения и детекторному модулю, а также выявление факторов, ограничивающих точность. Используются физико-технический анализ механизмов взаимодействия излучения с веществом, оценка счетной неопределенности и сравнительный анализ сцинтилляционных детекторов ( $\text{NaI(Tl)}$ ,  $\text{CsI(Tl)}$ ,  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ) и вариантов считывания. Показано, что для первого этапа рационально применять двухоконные спектральные критерии и дифференциальную схему измерений; сформулированы рекомендации по выбору энергетического диапазона и этапам практической реализации компактной измерительной системы.

### Введение

Оценка состава локального включения или неоднородности без нарушения целостности объекта – важная и сложная техническая задача, которая решается множеством различных способов. На практике наиболее оправдан-

ным подходом для достижения цели является не построение графической интерпретации, а получение лишь существенной информации: к какому классу относится вещество и чем оно отличается от базисного материала. При решении задач в таком ключе следует обратить внимание на спектрометрию ослабления внешнего гамма-излучения, поскольку она позволяет регистрировать измененный энергетический спектр, по которому видны колебания, свойственные конкретному химическому элементу [1–3]. Таким образом, задача оценки будет сводиться к выбору источника, геометрическому положению объекта и детектора при непосредственном измерении и собственно самому спектрометрическому детектору. Среди прочих наиболее доступны и технологичны сцинтилляционные детекторы (СД). Их компактность и высокое качество выходных данных доказано на практике [1].

Проведем анализ спектрометрии и обоснуем оправданность его применения.

### Спектрометрия как способ классификации состава включений

Предлагаемый подход основан на измерении энергетического ослабления фотонного пучка при прохождении через участок, содержащий локальное включение [1; 3]. Для явной интерпретации данных о химическом составе включения необходимо учитывать следующую закономерность: в диапазоне десятков–сотен кэВ вклад фотоэффекта возрастает при увеличении эффективного атомного номера, тогда как вклад комптоновского рассеяния в большей степени связан с электронной плотностью [1; 2].

Из выкладки следует, что информативным становится не столько общий уровень сигнала, сколько изменение формы энергетического спектра прошедшего излучения, а также соотношения сигналов в заранее выбранных энергетических окнах [1]. Однако есть некоторые особенности, которые надо учесть. Как правило, включение находится внутри некоторого вещества. Таким образом, спектр неизбежно исказится из-за эффектов рассеяния и поглощения, возникших по пути к целевому объекту. Поэтому схема измерения должна накапливать достаточное число зарегистрированных квантов в выбранных энергетических областях спектра, чтобы неопределенность была меньше различий, по которым выполняется классификация материала [1]. Принимается логика для счета событий  $\sigma \approx \sqrt{N}$ , относительная  $\sim 1/\sqrt{N}$ . Необходимо учитывать не только временные ограничения, но и ограничения, накладываемые на источник и защиту, которые в установках напрямую задают допустимый поток и геометрию измерения. Решение вопроса поиска оптимальной защиты в ключе активность/мощность, экранирование, контроль доступа и регламент работ также является значимым для применения спектрометрии [3; 4].

Потому наиболее верным решением будет вести разработку поэтапно: сначала обеспечить надежное бинарное различение двух классов материалов [3]. Как вариант: «низко- $Z$  / высоко- $Z$ » или «класс  $A$  / класс  $B$ ». Далее проводить расширение классификации на несколько групп и смешанные составы.

На первом этапе достаточно ограничиться двумя критериями: отношением счетов в низко- и высокоэнергетическом диапазонах и изменением их долей [1].

Перейдем к концепции оборудования. Минимальная конфигурация должна включать внешний источник излучения, коллимацию для ограничения зоны контроля и спектрометрический детектор с измерением энергии кванта [3].

Чтобы снизить влияние внешнего материала на спектр, целесообразно применять дифференциальные измерения: парные «участок с включением / участок без включения» и контроль фонового ослабления по соседним траекториям пучка. Такой прием снижает чувствительность к вариациям толщины и состава окружающего материала. В теории можно до-

полнительно регистрировать рассеянное излучение под фиксированным углом. Это повысит информативность, но заметно усложнит прибор. Однако данный подход требует практической аргументации [1–3].

Из отмеченных проблем главным остается выбор источника и энергетического диапазона: нужно найти компромисс между проникающей способностью, чувствительностью к составу и возможностью набрать требуемое число отсчетов за заданное время. На практике низкие энергии порядка 40–60 кэВ быстро «теряются» в окружающем материале, а слишком высокие энергии уменьшают долю фотоэффекта и снижают спектральный контраст по составу. Рабочим диапазоном выглядит 100–200 кэВ с возможностью выделения двух энергетических окон. Логика основывается на упрощенном двухэнергетическом подходе, но без задачи построения изображения [2; 3].

С точки зрения регистрации перспективными остаются СД как наиболее технологичный метод.  $NaI(Tl)$  /  $CsI(Tl)$  подходят при умеренных требованиях к разрешению,  $LaBr(Ce)$  – при необходимости лучшего энергетического разрешения и различения близких спектральных признаков [1; 5].

Фотоприемник выбирается исходя из требований по габаритам, питанию и стабильности. В компактных системах все чаще применяется  $SiPM$ -считывание, поскольку оно позволяет уменьшать размеры и энергопотребление, сохраняя спектрометрическую функциональность; при этом важно учитывать факторы, влияющие на качество спектра: температурная зависимость усиления, шумы, нелинейность при высоких скоростях счета [6].

В условиях реального контроля спектры неизбежно «плавают» из-за рассеяния и нестабильной геометрии, поэтому практичным направлением является формирование библиотеки эталонных спектров для типовых условий измерения и использование имитационного моделирования отклика детектора как инструмента настройки конфигурации до изготовления прототипа. Для  $LaBr(Ce)$  также важно учитывать внутренний фон, для чего в литературе применяются измерения и моделирование спектра собственного вклада кристалла [3; 7].

На практике библиотека эталонных спектров имеет смысл только при единой шкале

энергии: требуются регулярная энергетическая калибровка по опорным линиям источника и корректировка усиления перед сравнением спектров [1].

Для компактных модулей с *SiPM* это особенно актуально из-за зависимости температурного усиления и изменения шумовых характеристик; поэтому нужен либо контроль температуры, либо алгоритм стабилизации по пику [6].

Чтобы уменьшить влияние небольших изменений расстояния, коллимации и рассеяния, спектры целесообразно нормировать по участку спектра, слабо чувствительному к составу, либо по интегралу в выбранном «контрольном» энергетическом окне [3].

Отдельный практический пункт – контроль счетной скорости: при больших потоках заметными становятся мертвое время и наложение импульсов, которые искажают форму спектра и могут создавать ложные признаки в анализе [1]. Потому режим измерений задается дополнительно допустимой долей мертвого времени и требованиями радиационной безопасности измерительной установки: экранирование, ограничение доступа, регламент работ [4].

Если выбран *LaBr(Ce)*, собственный фон кристалла, включая вклад изотопов лантана и примесей, желательно учитывать отдельной «фоновой» регистрацией или моделью и вычитанием из рабочего спектра при сопоставлении

с библиотекой [7].

Для предварительной настройки геометрии и оценки вклада рассеяния следует использовать транспортное моделирование, чтобы еще до изготовления прототипа подобрать окна, коллимацию и ожидаемые уровни статистики [8].

### Заключение

Предлагаемая концепция классификации состава локальных включений по изменению энергетического спектра прошедшего излучения является технически реализуемой в форме компактной измерительной системы. Наиболее достижимая цель первого этапа – надежное бинарное различение двух классов материалов по устойчивым спектральным признакам при разумной геометрии и режиме измерений. Основные ограничения точности связаны с рассеянием и малым вкладом включения на фоне окружающего материала; практичный путь повышения устойчивости – умеренная коллимация, повышение эффективности сбора, дифференциальные измерения и строгая калибровка. Дальнейшая работа должна включать подбор рабочего диапазона, в т.ч. с двумя энергетическими окнами, испытания на образцах известного состава и уточнение требований к детекторному модулю: тип сцинтиллятора, фотоприемник, вопросы стабильности работы.

### Список литературы/References

1. Knoll, G.F. Radiation detection and measurement / G.F. Knoll. – John Wiley & Sons, 2010.
2. Ali, E.S.M. Photonuclear attenuation and XCOM cross sections in EGSnrc / E.S.M. Ali, E. Mainegra-Hing, D.W.O. Rogers. – Technical Report CLRP, 2014. – P. 14–01.
3. IAEA. Technical data on nucleonic gauges. – Vienna : IAEA, 2005. – (IAEA-TECDOC-1459).
4. IAEA. Radiation safety in the use of nuclear gauges (SSG-58) – in a nutshell. – Vienna : IAEA, 2022.
5. P.L. de Andrade Characterization of material using dual-energy gamma-ray tomography: determination of atomic number and density / P.L. de Andrade, [et al.] // Applied Radiation and Isotopes. – 2025. – Vol. 218. – P. 111702.
6. Milbrath, B.D. Comparison of  $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$  and  $\text{NaI(Tl)}$  scintillators for radio-isotope identification devices / B.D. Milbrath, et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2007. – Vol. 572. – No. 2. – P. 774–784.
7. Grodzicka-Kobylka, M. Silicon photomultipliers in gamma spectroscopy with scintillators / M. Grodzicka-Kobylka, M. Moszyński, T. Szcześniak // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2019. –

Vol. 926. – P. 129–147.

8. Sweezy, J.E. MCNP – a general Monte Carlo N-particle transport code, version 5: overview and theory / J.E. Sweezy, [et al.] – Los Alamos : Los Alamos National Laboratory, 2003.

---

© Н.А. Голубев, И.А. Лоскутов, Д.А. Скворцова, 2026

УДК 330.101.54

М.В. БАТЮКОВ, В.А. ГРЕЧУШКИН, В.М. КРАВЧЕНКО, Г.И. ПОЛЕННИКОВА  
Липецкий институт кооперации (филиал) АНО ВО «Белгородский университет  
кооперации, экономики и права», г. Липецк

## МЕТОДОЛОГИЯ АЗ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ

*Ключевые слова:* диаграмма Исикавы; диаграмма Парето; ключевые показатели эффективности (КПЭ) проекта; метод «5 почему»; методология АЗ; формат АЗ; этапы реализации проектов АЗ.

*Аннотация.* Целью исследования являются рассмотрение и анализ основных положений реализации проектов по повышению эффективности в соответствии с методологией АЗ. Для достижения цели исследования поставлены задачи: установить порядок реализации проектов по повышению эффективности с использованием методологии АЗ; описать условия открытия и этапы реализации проектов АЗ, в том числе с помощью инструментов (диаграммы Исикавы, метода «5 почему», диаграммы Парето). В исследовании использовались методы сравнительного, логического, графического, экономико-статистического анализа. Гипотезой исследования устанавливается влияние активного применения методологии АЗ в компании на возможности повышения операционной эффективности реализации проектов. В качестве достигнутых результатов детализированы этапы реализации проектов АЗ с описанием проводимых работ и графическим анализом текущей ситуации (по базовому и целевому уровням) и выходом на ключевые показатели эффективности (КПЭ) проекта.

Работа над проектами с использованием методологии АЗ осуществляется с целью достижения и улучшения целевых уровней КПЭ предприятия, исходя из оптимизации потока создания ценности в целом. Проекты АЗ открываются в направлении достижения бизнес-целей, а также решения про-

блем, причина и способ устранения которых неизвестны.

Отечественными предприятиями все большее внимание уделяется современным методам повышения эффективности производства вообще и проектной деятельности в частности. Одним из таких инструментов выступает методология АЗ: практическая идеология, направленная на командное решение проблем и разработку улучшений, базирующаяся на принципах:

- фокуса на конкретной проблеме;
- командной работы;
- визуализации;
- использования в работе специфических принципов анализа и разработки;
- мероприятий по улучшению: диаграмма Исикавы, метод «5 почему», диаграмма Парето, дерево причин, карты последовательности технологических операций (КПТО), структурированное решение проблем (СРП) на этапе генерации решений и т.д.;
- проверки на практике;
- использования объективной информации;
- закрепления результата (для предотвращения возврата на исходные позиции успех должен быть закреплён).

Обычно в этом случае используется формат АЗ: метод описания процесса в компактной форме, предусматривающий практическое решение проблем, подачи предложений, планирования и оценки хода процесса на листе бумаги формата АЗ (297 x 420 мм).

Формат АЗ открывается при выполнении условий, указанных в табл. 1.

Проекты АЗ открываются только при отсутствии известного решения проблемы на текущий момент. Если решение известно,

**Таблица 1. Условия открытия проекта А3**

№ п/п	Условие открытия	Срок открытия
1	Ежегодно, на этапе формирования плана достижения стратегических целей предприятия на год	В течение одного месяца после получения проекта целей
2	Если в течение трех месяцев не выполняется КПЭ подразделения/ предприятия	В течение четырех месяцев
3	Если в течение одного месяца значимо не выполняется КПЭ подразделения/предприятия (негативное влияние на <i>EBITDA</i> свыше определенной суммы)	В течение двух месяцев
4	В других случаях по инициативе подразделения, Владельца процесса, координатора КПЭ или других заинтересованных лиц	В течение одного месяца после инициации

**Таблица 2. Этапы проекта А3 с описанием работ**

№ п/п	Этап	Описание работ
1	Целеполагание: выбор темы проекта А3, назначение лидера и рабочей группы проекта А3, установка базового и целевого уровня КПЭ проекта А3, формирование устава и графика встреч по проекту А3	<p>1. Устанавливаемая общая цель по проекту А3 удовлетворяет критериям <i>Smart</i>: конкретная (не более шести месяцев), измеримая (указываются Целевой и Базовый уровень КПЭ, метрика Последствий), достижимая – например, 20 % от технологически обоснованного уровня (<i>ТОУ</i>), актуальная, амбициозная, определена во времени (идеальный срок реализации проекта – не более шести месяцев). Цель не должна быть слишком крупной, чтобы не затягивать проект во времени, но должна быть достаточно амбициозной, чтобы использование временного и человеческого ресурса было оправдано.</p> <p>2. Цель проекта А3 устанавливается как для верхнеуровневого КПЭ (КПЭ подразделения, на который влияет проект А3), так и для КПЭ более низкого уровня, а также указывается метрика (КПЭ) последствий – ограничивающий показатель, который не может быть ухудшен в рамках реализации проекта А3.</p> <p>3. По итогам данного этапа формируются цели (устав) проекта А3.</p> <p>4. Устав проекта А3 рекомендуется фиксировать распорядительным документом (распорядительный документ готовит Владелец процесса при поддержке Службы повышения эффективности производства). В случае изменения в ходе реализации А3 Лидера проекта, состава Рабочей группы, КПЭ проекта А3 выпускается новый распорядительный документ с указанием вносимых изменений. Устав утверждает Спонсор проекта.</p> <p>5. Устав может быть зафиксирован распоряжением или иным другим способом (в материалах презентации, почте, протоколе и т.п.).</p> <p>6. На стартовом совещании Рабочая группа совместно с Лидером проекта А3 осуществляет предварительный анализ причин путем построения диаграммы Исикава. Допускается использование любых других схем (дерево причин и т.п.), отражающих корневые причины проблем</p>
2	Измерение и анализ: определение факторов,	1. До проведения второго совещания по проекту Лидер проекта А3 с привлечением участников Рабочей группы осуществляет анализ корневых причин проблем на основе:

2	<p>влияющих на проблему и их доли влияния на проблему, построение диаграммы Исикавы</p>	<p>сбора данных о проблеме, подтверждение корректности системы измерений данных; анализа данных с применением методов «5 почему», дерева причин, статистических методов и т.п.; исследования проблемной ситуации «по месту, по факту» (обход оборудования и технологии, хронометраж, наблюдение за деятельностью в ее текущем состоянии и т.д.); интервью с персоналом – Владелец процесса по проблеме; эксплуатационных документов (ДИ, ТИ, агрегатные журналы, журналы приемки и сдачи смены, технические отчеты и т.д.).</p> <p>2. По итогам проведенного анализа актуализируется диаграмма Исикавы («рыбья кость») или дерево причин с указанием корневых причин проблем.</p> <p>3. Определяется доля влияния каждого фактора на основе информации в ИС СПЭП, FME Аанализа и других инструментов.</p> <p>4. Информация о доле влияния факторов/проблем визуализируется на диаграмме Исикавы. Визуализируется также, на какие причины можно повлиять, на какие нет. Допускается не указывать долю влияния причин по мелким веткам диаграммы Исикавы (доля влияния 1 % и менее).</p>
3	<p>Оптимизация, проверка: разработка плана мероприятий, построение матрицы приоритизации мероприятий</p>	<p>1. На совещании рабочей группы на основании анализа фактов, предоставленных Лидером проекта АЗ, участники совещания проводят «мозговой штурм» для разработки дополнительных мероприятий по решению проблемы.</p> <p>2. При наличии нескольких существенно влияющих факторов возникновения проблемы рекомендуется фокусироваться на факторы с большим влиянием. В качестве мероприятий могут быть предложены как мероприятия, направленные на возврат в «нормальное» состояние (в соответствии с действующей нормативной и технической документацией), так и изменение процесса: изменение существующей технологии, изменение (выбор) новых поставщиков материалов (или изменение договоров на поставку), изменение систем измерения, внедрение систем защиты от ошибок и т.д.</p> <p>3. Разрабатываемые мероприятия должны соответствовать причинам диаграммы «Исикавы»/дерева причин и должны быть направлены на устранение корневой причины проблемы, а не ее последствий, то есть проблема должна больше не возникнуть после реализации мероприятий. По мероприятиям указываются срок и ответственный за исполнение мероприятия. Рекомендуется по каждому мероприятию указывать количественную оценку планируемого эффекта.</p> <p>4. Приоритизация мероприятий осуществляется участниками Рабочей группы на основании анализа скорости/сложности/стоимости их реализации.</p> <p>5. Согласование разработанных мероприятий с исполнителями осуществляется на совещании с Рабочей группой. Дополнительное согласование принятых решений не требуется при условии присутствия на совещании представителей всех действующих подразделений</p>
4	<p>Реализация, оценка эффекта: внедрение мероприятий, отслеживание хода реализации мероприятий, оценка эффекта</p>	<p>1. Ответственность за своевременное исполнение разработанных мероприятий возложена на ответственного за реализацию мероприятия.</p> <p>2. Факт реализации мероприятий подтверждает Лидер проекта АЗ в течение всего проекта в соответствии с плановыми сроками реализации. Факт соблюдения сроков реализации и их перенос фиксируются Лидером проекта на доске управления проектом АЗ.</p> <p>3. Мониторинг достигнутого результата после реализации мероприятий осуществляет Лидер проекта АЗ. При этом рекомендуется еженедельно/ежемесячно отслеживать эффект как по уровню всего КПЭ, на улучшение которого был направлен проект АЗ, так и по отдельным причинам, на устранение которых были направлены мероприятия.</p> <p>4. Срок отслеживания эффективности всего проекта АЗ составляет не менее трех месяцев с момента реализации не менее 90 % мероприятий проекта АЗ от их общего количества. Он может быть скорректирован с учетом частоты возникновения проблемы.</p>

4		<p>5. Эффект считается положительным, если в течение трех месяцев подряд после выполнения не менее 90 % мероприятий проекта А3 от их общего количества достигается целевое значение КПЭ, на который был нацелен проект А3 (или зафиксировано улучшение относительно базового уровня)</p>
5	Стандартизация: закрепление результата, закрытие проекта А3	<p>1. В случае достижения положительного результата проекта А3 (по итогам оценки эффективности) Лидер проекта А3 совместно с Рабочей группой определяет способ его закрепления: изменение нормативного или организационно-распорядительного документа (ТИ, ДИ, инструкции по эксплуатации оборудования), обучение персонала; организация отслеживания контрольной карты по показателю; пересмотр норм и т.п.; определение ответственных за закрепление результатов и срок выполнения (закрепления результата).</p> <p>2. Контроль закрепления достигнутого результата осуществляет Лидер проекта А3.</p> <p>3. Решение о закрытии проекта А3 рекомендуется закреплять распорядительным документом при выполнении условий закрытия проекта. Распорядительный документ утверждается Спонсором проекта, готовит проект распоряжения Владелец процесса при поддержке Службы повышения эффективности производства.</p> <p>4. В распорядительном документе о закрытии проекта могут фиксироваться отдельные мероприятия с длительным сроком внедрения (более шести месяцев) или нереализованные мероприятия по закреплению результата проекта. Мониторинг реализации и эффективности подобных мероприятий передается в техническую службу (ТС) соответствующего подразделения в соответствии с утвержденной процедурой.</p> <p>5. При закрытии эффективного проекта А3 Спонсору проекта рекомендуется проводить подведение итогов совместно с командой проекта с использованием форматов публичного признания результатов: объявления благодарности, предоставления позитивной обратной связи команде и т.д.</p>

**Таблица 3.** Применяемые в проекте А3 инструменты

№ п/п	Инструмент	Описание
1	Диаграмма Исикавы («рыбья кость»)	Графический способ исследования и определения наиболее существенных причинно-следственных взаимосвязей между факторами и последствиями в исследуемой ситуации или проблеме (условия труда – люди – методы – проблема) является средством визуализации и организации информации, которое облегчает понимание и конечную диагностику определенной проблемы
2	Метод «5 почему»	Принцип анализа, использующий вопросы для изучения причинно-следственных связей, лежащих в основе конкретной проблемы и выявления первопричины. Рассматривая логику в направлении «Почему?», постепенно раскрывается вся цепь последовательно связанных между собой причинных факторов, оказывающих влияние на причину проблемы
3	Диаграмма Парето	Графический метод, предусматривающий количественное ранжирование всех причин проблемы по принципу «сначала самое главное»

необходима его реализация без открытия проекта А3. Проекты А3 рекомендуется открывать, когда в решении проблемы задействовано несколько подразделений. Если решение проблемы лежит в зоне ответственности одного

подразделения, может быть использована практика сессии по решению проблем без открытия проекта А3.

Участники процесса должны обладать следующими техническими навыками при реали-

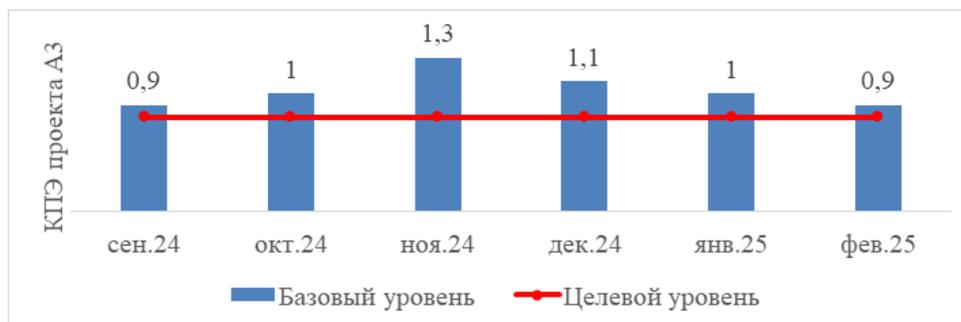


Рис. 1. Анализ текущей ситуации

зации проектов А3:

- понимание производственного процесса, технологии и бизнес-процесса;
- умение анализировать ситуацию;
- общее представление о том, как рассматриваются, реализуются и контролируются идеи на предприятии;
- знание КПЭ своего структурного подразделения/участка/агрегата;
- сбор и анализ данных;
- умение выявлять причинно-следственные связи;
- знание основных видов потерь и инструментов производственной системы (табл. 3).

Результатом вышеописанных работ при

реализации проектов А3 проводится графический анализ текущей ситуации (по базовому и целевому уровням) и выходом на ключевые показатели эффективности проекта (рис. 1).

Рекомендуется размещать оперативную информацию о ходе реализации текущих открытых проектов А3 на доске (стенде) управления проектами А3. На доске управления проектом А3 также рекомендуется визуализировать «цену вопроса» – стоимость промедления проекта А3. Эффективные проекты А3 (технические решения проектов) могут быть выдвинуты на профильные конкурсы, проводимые в компании, при соответствии критериям соответствующих положений.

### Список литературы

1. Официальный сайт компании НЛМК [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://nlmk.com/ru/responsibility/social-responsibility>.
2. Корпоративный портал НЛМК [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://nlmk.one/stream>.
3. Корпоративный журнал Группы компаний НЛМК [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.up-pro.ru/library/personnel\\_management/motivation/vyshe-kachestvo.html](http://www.up-pro.ru/library/personnel_management/motivation/vyshe-kachestvo.html).
4. От культа «цифры» к реальным деньгам [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://logirus.ru/articles/solution/ot\\_kulta\\_-tsifry-\\_k\\_realnym\\_dengam.html](https://logirus.ru/articles/solution/ot_kulta_-tsifry-_k_realnym_dengam.html).
5. Металлоснабжение и сбыт. Электронный журнал [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://metalinfo.ru/ru/news/127621>.

### References

1. Ofitsial'nyy sayt kompanii NLMK [Electronic resource]. – Access mode : <https://nlmk.com/ru/responsibility/social-responsibility>.
2. Korporativnyy portal NLMK [Electronic resource]. – Access mode : <https://nlmk.one/stream>.
3. Korporativnyy zhurnal Gruppy kompaniy NLMK [Electronic resource]. – Access mode : [http://www.up-pro.ru/library/personnel\\_management/motivation/vyshe-kachestvo.html](http://www.up-pro.ru/library/personnel_management/motivation/vyshe-kachestvo.html).
4. Ot kul'ta «tsifry» k real'nyim den'gam [Electronic resource]. – Access mode : [https://logirus.ru/articles/solution/ot\\_kulta\\_-tsifry-\\_k\\_realnym\\_dengam.html](https://logirus.ru/articles/solution/ot_kulta_-tsifry-_k_realnym_dengam.html).

articles/solution/ot\_kulta\_-tsifry-\_k\_realnym\_dengam.html.

5. Metallosnabzheniye i sbyt. Elektronnyy zhurnal [Electronic resource]. – Access mode : <https://metalinfo.ru/ru/news/127621>.

---

© М.В. Батюков, В.А. Гречушкин, В.М. Кравченко, Г.И. Поленникова, 2026

УДК 332.12

Б.Н. ЖИГЖИТОВА, А.О. АЮШЕЕВА, А.И. ГРИГОРЬЕВА  
ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет  
технологий и управления», г. Улан-Удэ

## РАЗВИТИЕ ПРИГРАНИЧНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА РЕГИОНОВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА НА ПРИМЕРЕ ПРИМОРСКОГО КРАЯ

*Ключевые слова:* внешнеторговый оборот; внешнеэкономическая деятельность; Дальневосточный федеральный округ; импорт; приграничное сотрудничество; Приморский край; экспорт.

*Аннотация.* В статье рассматривается приграничное сотрудничество регионов Дальнего Востока на примере Приморского края, проведен анализ внешнеэкономической деятельности Приморского края, определены основные направления экспорта и импорта и перспективы приграничного сотрудничества.

Цель исследования – рассмотреть приграничное сотрудничество на примере Приморского края.

Гипотеза исследования: влияние географического положения на развитие приграничного сотрудничества.

Методы исследования: анализ и сравнение.

Достигнутые результаты: анализ внешнеэкономической деятельности Приморского края показал, что наиболее эффективное взаимодействие и сотрудничество осуществляются с приграничными территориями.

### Актуальность

В соответствии с ФЗ от 26.07.2017 № 179-ФЗ «О приграничном сотрудничестве» под приграничным сотрудничеством понимается часть международных отношений Российской Федерации, международных и внешнеэкономических связей приграничных субъектов Российской Федерации и муниципальных образований приграничных субъектов Российской Федерации с субъектами приграничного сотрудни-

чества сопредельных государств [1].

Для Дальневосточного федерального округа (ДФО) эффективное приграничное сотрудничество все более приобретает стратегически важный характер, что обусловлено тем фактом, что из 11 регионов округа имеют статус приграничных [3]. К субъектам Российской Федерации, входящим в состав ДФО, на территориях которых расположены дальневосточные приграничные территории, относятся Республика Бурятия, Забайкальский, Приморский и Хабаровский край, Амурская область и Еврейская автономная область [4]. В сумме они занимают площадь более двух млн км с населением 6,25 млн человек, составляющих 76,9 % населения ДФО и 30,7 % территории ДФО. Наибольшим по численности дальневосточным приграничным субъектом является Приморский край. Поэтому рассмотрим более детально внешнеэкономическую деятельность Приморского края за 2018–2021 гг. и перспективы его приграничного сотрудничества.

Внешнеторговый оборот по Приморскому краю в целом имеет положительную динамику. Данные внешнеторгового оборота приведены в табл. 1.

Внешнеторговый оборот дальневосточного федерального округа за 2018–2021 гг. имеет в целом положительную динамику, только в 2020 г. наблюдается отрицательное значение. Так, внешнеторговый оборот ДФО составил в 2019 г. 36 762,4 млн долл., что на 6,57 % выше уровня 2018 г. В 2020 г. он снизился на 12,63 % по сравнению с 2019 г. В 2021 г. увеличился и составил 32 117,4 млн долл. Наибольшую долю внешнеторгового оборота ДФО занимает товарооборот Приморского края. Товарооборот Приморского края имеет такую же тенденцию. Так, в 2019 г. внешнеторговый оборот составил 92 727 млн долл., что на 22,86 % больше

Таблица 1. Внешнеторговый оборот Приморского края за 2018–2021 гг.

Федеральные округа и субъекты РФ, (млн долл.)	Внешнеторговый оборот				Темп прироста, %		
	2018	2019	2020	2021	2019/2018	2020/2019	2021/2020
Дальневосточный федеральный округ	34 495,2	36 762,1	32 117,4	39 199,8	6,57	-12,63	22,05
Приморский край	7 547,2	9 272,7	7 930,5	10 617,0	22,86	-14,4	33,86

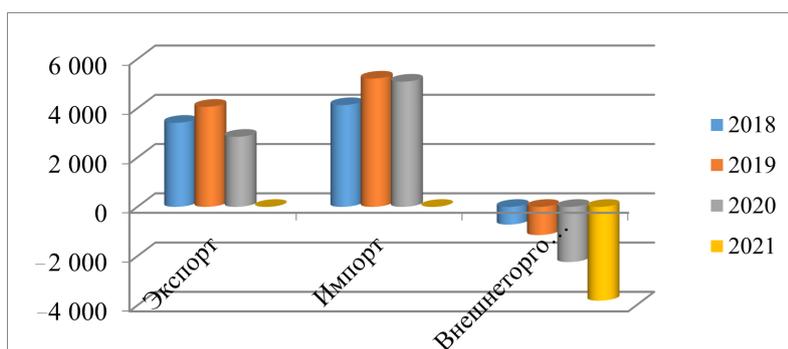


Рис. 1. Динамика экспорта, импорта и внешнеторгового сальдо Приморского края

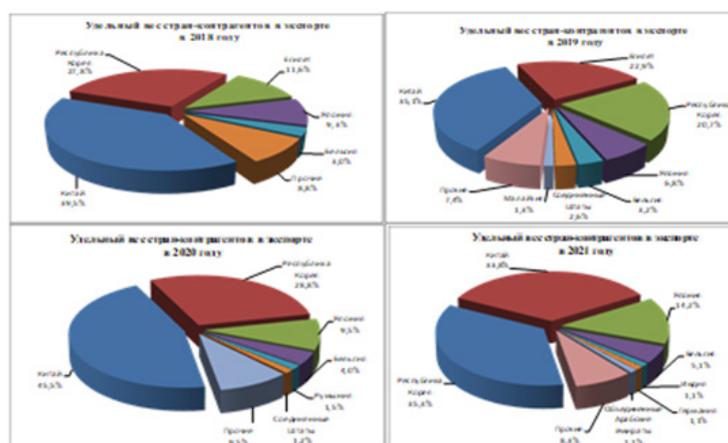


Рис. 2. Удельный вес стран-контрагентов в экспорте за 2018–2021 гг.

уровня 2018 г. В 2020 г. по сравнению с 2019 г. снизился на 14,4 %. В 2021 г. товарооборот увеличился по сравнению с 2020 г. на 33,86 % и составил 10 617,0 млн долл.

Динамика экспорта, импорта и внешнеторгового сальдо Приморского края более наглядно представлено в рис. 1.

На рис. 1 наблюдаем в целом отрицательную динамику внешнеторгового сальдо за ана-

лизируемый период.

В целом импорт превышает экспорт Приморского края. В 2019 г. внешнеторговое сальдо имеет отрицательное значение –1 145,6 млн долл. и –3 807,7 млн долл. в 2021 г.

Экспорт Приморского края имеет такую же тенденцию, что и в целом внешнеторговый оборот за анализируемый период. С 2018 по 2019 г. наблюдается увеличение импорта, в 2020 г. сни-

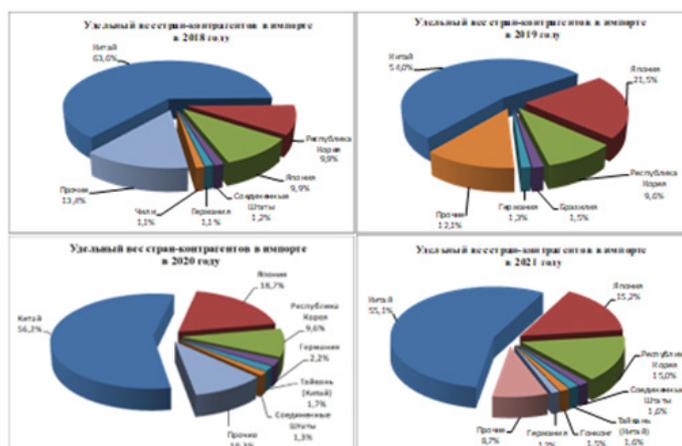


Рис. 3. Удельный вес стран-контрагентов импорта за 2018–2021 гг.

жается на 2,38 % по сравнению с 2019 г. Импорт в 2021 г. составил 7 212,3 млн руб., что на 41,84 % больше.

Более подробную структуру экспорта товаров Приморского края по странам-контрагентам привели на рис. 2.

Как видно из рис. 2, основными торговыми партнерами Приморского края при экспорте являются следующие страны.

1. Китай выступает основной страной в экспорте, его доля составляла в 2018 г. 39,5 %, в 2019 г. – 35,1 %, в 2020 г. – 45,5 % и в 2021 г. – 33,8 %. В 2021 г. произошло уменьшение экспорта на 142,4 млн долларов США. Основными статьями экспорта являются ракообразные, рыба мороженая, соя.

2. Республика Корея: за анализируемый период наблюдается увеличение стоимости экспорта. Так, доля в 2018 г. составила 27,8 %, в 2019 г. – 20,7 %, в 2020 г. – 28,8 % и в 2021 г. – 35,3 %. Основными статьями экспорта являются рыба мороженая, ракообразные, отходы и лом черных металлов.

3. Египет: в 2019 г. экспорт составил 932,3 млн долларов США или 22,9 % экспорта. Произошло уменьшение экспорта на 246,3 млн долларов США (в 1,6 раза) по сравнению с 2018 г. Главные статьи экспорта: вертолеты, самолеты, космические аппараты и ракеты. В 2020 и 2021 гг. экспорт в эту страну не осуществлялся.

4. Япония: доля составила в 2018 г. 11,6 %, в 2019 г. – 6,8 %, в 2020 г. – 9,5 %, в 2021 г. – 14,2 %. В 2021 г. произошло увеличение экспорта, он составил 483 млн долларов

США. Основные статьи экспорта: рыба мороженая, алюминий необработанный, двигатели внутреннего сгорания, древесина обработанная, толщиной не более 6 мм.

Остальные страны, такие как Бельгия, Малайзия, Индия, Германия, Соединенные штаты, занимают незначительную долю в экспорте Приморского края, менее 5 %. Основные статьи экспорта составляют: масла и другие продукты перегонки каменноугольной смолы; нефть и нефтепродукты (кроме сырых); алмазы обработанные или необработанные; суда и прочие плавучие конструкции, предназначенные на слом; филе рыбное и прочее мясо рыб; вычислительные машины и их блоки; приборы для автоматического регулирования и управления.

Для более полной картины внешнеторгового оборота рассмотрим импорт товаров Приморского края, представленного на рис. 3.

Как видно из рис. 3, основными торговыми партнерами Приморского края при импорте являются следующие страны.

1. Китай: его доля в 2018 г. составляет 63,6 %, в 2019 г. – 54 %, в 2020 г. – 56,2 % и в 2021 г. – 55,1 %, т.е. больше половины импорта осуществляется из Китая. Основные статьи импорта: вычислительные машины и их блоки, аппараты электрические телефоны и телеграфы, части и принадлежности для машин, аппараты электрических телефонов и телеграф.

2. Республика Корея. Доля в 2018 г. составляет 9,9 %, в 2019 г. – 21,5 %, в 2020 г. – 18,7 %, а в 2021 г. – 15,2 %. В импорте преобладают

такие товары, как бульдозеры, экскаваторы, полимеры этилена в первичных формах, нефть и нефтепродукты, металлоконструкции из черных металлов, суда круизные, паромы, грузовые и др.

3. Япония. Доля в 2018 г. составляет 9,9 %, в 2019 г. – 54 %, в 2020 г. – 56,2 % и в 2021 г. – 55,1 %. Главные статьи импорта: части и оборудование автомобилей, автомобили легковые, двигатели внутреннего сгорания с искровым зажиганием, кузова.

Остальные страны, такие как Германия, Соединенные штаты, Чили, Бразилия, Тайвань, Вьетнам, составляют незначительную долю в импорте Приморского края, менее 2 %. Основными статьями импорта являются: отходы и лом алюминиевые; нефть и нефтепродукты; мотоциклы и велосипеды с двигателем; коляски; машины подъемные; суда рыболовные; плавучие базы; суда круизные, паромы, грузовые; станки для обработки дерева, инструмент ручной электромеханики; электронные интегральные схемы и микросборки; каучук натуральный; свинина, свиной жир и жир домашней птицы; рыба мороженая; мясо крупного рогатого скота замороженное; мясо и пищевые субпродукты домашней птицы; фрукты, орехи и прочее, приготовленное иным способом.

Таким образом, из вышеприведенного анализа можно сделать выводы о том, что внешнеторговый оборот за анализируемый период имеет тенденцию к росту и положительную динамику. В структуре внешнеторгового оборота наибольшую долю занимает импорт продукции.

Основными странами-партнерами Приморского края являются Китай, Республика Корея, Египет и Япония.

Современные геополитические и геоэкономические вызовы подвигают к интенсификации работ в российских приграничных регионах, максимально выгодно для собственного социально-экономического развития использовать факторы географического положения и иные факторы социально-экономического характера.

В современных геополитических условиях вопросы развития приграничья, анализ социально-экономических процессов, протекающих на данных территориях, оценка возможностей развития за счет использования потенциала приграничного положения имеют важное значение в обеспечении экономической безопасности России.

На разных участках границы сотрудничество обладает своей спецификой и степенью эффективности.

Анализ современного состояния приграничного сотрудничества на разных участках государственной границы, с одной стороны, обеспечивает возможность теоретического осмысления приграничного сотрудничества как инструмента социально-экономического развития региона, а с другой, позволяет обосновать практические рекомендации по трансформации и повышению эффективности данного инструмента применительно к отдельным приграничным регионам Дальневосточного Федерального округа.

### Список литературы

1. Об основах приграничного сотрудничества: федеральный закон от 26 июля 2017 г. № 179-ФЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71630188>.
2. Концепция приграничного сотрудничества в Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.scrf.gov.ru/security/State/document29>.
3. Григорьева, А.И. Современное развитие и перспективы приграничных регионов Дальневосточного федерального округа / А.И. Григорьева, А.О. Аюшеева, Б.Н. Жигжитова // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 1(127). – С. 126–130.
4. Аюшеева, А.О. Современные социально-экономические процессы: проблемы, тенденции и перспективы развития / А.О. Аюшеева, Б.Н. Жигжитова // Современные социально-экономические процессы: проблемы, тенденции и перспективы развития : монография / под ред. Г.Ю. Гуляева. – 2023. – С. 23.
5. Внешняя торговля ДФО [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://dvtu.customs.gov.ru/statistic>.

**References**

1. Ob osnovakh prigranichnogo sotrudnichestva: federal'nyy zakon ot 26 iyulya 2017 g. № 179-FZ [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71630188>.
  2. Kontseptsiya prigranichnogo sotrudnichestva v Rossiyskoy Federatsii [Electronic resource]. – Access mode : <http://www.scrf.gov.ru/security/State/document29>.
  3. Grigor'yeva, A.I. Sovremennoye razvitiye i perspektivy prigranichnykh regionov Dal'nevostochnogo federal'nogo okruga / A.I. Grigor'yeva, A.O. Ayusheyeva, B.N. Zhigzhitova // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2022. – № 1(127). – S. 126–130.
  4. Ayusheyeva, A.O. Sovremennyye sotsial'no-ekonomicheskiye protsessy: problemy, tendentsii i perspektivy razvitiya / A.O. Ayusheyeva, B.N. Zhigzhitova // Sovremennyye sotsial'no-ekonomicheskiye protsessy: problemy, tendentsii i perspektivy razvitiya : monografiya / pod red. G.YU. Gulyayeva. – 2023. – S. 23.
  5. Vneshnyaya trgovlya DFO [Electronic resource]. – Access mode : <https://dvtu.customs.gov.ru/statistic>.
- 

© Б.Н. Жигжитова, А.О. Аюшеева, А.И. Григорьева, 2026

УДК 332

А.Н. КУЗЯШЕВ<sup>1</sup>, Ю.Я. РАХМАТУЛЛИН<sup>1</sup>, Э.А. ГУМЕРОВ<sup>2</sup>, Е.И. МЕНЬШИКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АНО ВО «Московский международный университет»;

<sup>2</sup>НОЧУ ВО «Московский финансово-промышленный университет «Синергия», г. Москва

## МЕХАНИЗМЫ РЕАЛИЗАЦИИ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ГОСУДАРСТВЕННО-ЧАСТНОГО ПАРТНЕРСТВА И МУНИЦИПАЛЬНО-ЧАСТНОГО ПАРТНЕРСТВА

*Ключевые слова:* государственно-частное партнерство (ГЧП); муниципально-частное партнерство (МЧП); инвестиционный договор; концессионное соглашение; сервисный контракт.

*Аннотация.* Цели и задачи исследования заключаются в сравнительном анализе государственно-частного партнерства (ГЧП) и муниципально-частного партнерства (МЧП). Результаты исследования: комплексно проанализированы потенциал и ограничения использования механизмов ГЧП и МЧП в государственной и муниципальной инвестиционной политике, а также обоснованы тенденции и предложения по их развитию в России с помощью конструктивного, абстрактно-логического, монографического и других методов.

Как известно, в России, ГЧП и МЧП регулируются единым Федеральным законом № 224-ФЗ от 13 июля 2015 г., который закрепляет правовые основы этих форм сотрудничества [7]. При этом различие между ними определяется уровнем публичного партнера.

1. ГЧП – это соглашение, заключаемое между частным инвестором и публичной стороной в лице Российской Федерации или субъекта РФ. Такие проекты обычно имеют крупный масштаб, значимы для нескольких регионов или отраслей, требуют значительных финансовых ресурсов. Примеры: строительство федеральных автодорог, портовой инфраструктуры, крупных объектов здравоохранения или энергетики.

2. МЧП – соглашение между частным партнером и муниципальным образованием. Это инструмент, который применяется на местном

уровне, в границах одного города, района или сельского поселения [4]. МЧП используется для решения локальных задач: модернизация коммунальных сетей, реконструкция социальных объектов, развитие городской среды, общественного транспорта. В целом разница между государственно-частным партнерством и муниципально-частным партнерством отражена в табл. 1.

Таким образом, МЧП можно рассматривать как ключевой инструмент муниципальной инвестиционной политики, обеспечивающий решение конкретных задач территориального развития и повышение качества жизни населения. Муниципально-частное партнерство, являясь разновидностью государственно-частного партнерства, наследует все его общие черты, но при этом сталкивается с рядом специфических сложностей и рисков, обусловленных уровнем реализации проектов и особенностями муниципального управления [3]. Таким образом, реализация МЧП требует комплексного подхода, включающего не только разработку привлекательных для бизнеса условий, но и институционального укрепления муниципальной власти, создания системы поддержки инвесторов, а также выработку стандартов управления проектами.

Муниципально-частное партнерство в России реализуется через целый набор инструментов, которые позволяют муниципалитетам привлекать частные инвестиции для развития инфраструктуры, модернизации коммунальной и социальной сферы, благоустройства территорий. Основные механизмы МЧП закреплены в Федеральном законе № 224-ФЗ «О государственно-частном партнерстве, муниципально-частном партнерстве...», а также в Федеральном законе № 115-ФЗ «О концессионных

Таблица 1. Ключевые отличия государственно-частного и муниципально-частного партнерства

Признак	Государственно-частное партнерство	Муниципально-частное партнерство
Уровень публичного партнера	Федерация или ее субъект	Муниципальное образование
Масштаб проектов	Крупные инфраструктурные и стратегические проекты	Локальные проекты, имеющие значение для конкретного муниципального образования
Источники финансирования	Федеральный и региональный бюджеты, частный капитал	Муниципальный бюджет, частный капитал
Цели	Национальное или стратегическое развитие, стратегические отрасли	Решение конкретных задач местного значения
Объекты	Федеральные автодороги, крупные больницы, промышленные парки, порты и пр.	ЖКХ, транспорт, социальные учреждения, благоустройство
Уровень регулирования	Ведущая роль федеральных и региональных органов власти	Участие органов местного самоуправления
Особенности управления	Высокая сложность, многоуровневая координация	Ближе к интересам населения, больше гибкости в принятии решений

соглашениях». Рассмотрим ключевые формы.

1. Концессионные соглашения. Концессия – наиболее распространенный инструмент ГЧП и МЧП, применяемый для передачи частному инвестору объектов инфраструктуры в пользование и эксплуатацию на определенный срок с условием инвестирования в модернизацию или строительство [2].

2. Контракты жизненного цикла (КЖЦ). Контракты жизненного цикла – это соглашения, при которых частный партнер не только проектирует и строит объект, но и отвечает за его эксплуатацию и обслуживание в течение длительного времени [5].

3. Аренда с инвестиционными обязательствами. Данная модель предполагает передачу муниципального имущества в аренду частному партнеру с условием вложения средств в его реконструкцию или модернизацию.

4. Инвестиционные договоры и соглашения о развитии застроенных территорий. Такие формы характерны для сферы градостроительства: инвестор получает право на комплексное развитие территории в обмен на инвестиции в инфраструктуру или социальные объекты.

5. Сервисные контракты и аутсорсинг муниципальных услуг. В ряде случаев муниципалитеты передают частным операторам оказание услуг (уборка, вывоз мусора, содержание инфраструктуры).

6. Создание совместных предприятий (СП). При такой форме взаимодействия муниципалитет и частный партнер создают юридическое лицо с распределением долей участия [2].

Таким образом, арсенал механизмов МЧП достаточно широк, что позволяет адаптировать форму партнерства под конкретные потребности муниципалитета. Далее следует рассмотреть динамику реализации проектов ГЧП в Российской Федерации в последние годы. В табл. 2 представлены данные за период 2019–2024 гг., которые сформированы на основе официальной информации Министерства экономического развития РФ.

Анализ вышеперечисленных показателей показывает, что в 2019–2021 гг. наблюдалась волнообразная динамика – падение числа проектов в 2020 г. (с 371 до 312, то есть до –16 %), что можно связать с пандемией и экономической неопределенностью. 2022 г. стал пиком по числу проектов (475, рост на 24 % по сравнению с 2021 г.), что отражает активизацию инфраструктурных инициатив на фоне необходимости стимулировать экономику. Период 2023–2024 гг. демонстрируют резкое сокращение проектов – 326 в 2023 г. и 215 в 2024 г. (–55% к 2022 г.), что может объясняться консолидацией усилий на крупных проектах, изменением условий привлечения инвестиций и

**Таблица 2.** Основные показатели динамики реализации проектов ГЧП в российской Федерации за 2019–2024 гг. [2; 11]

	Год					
	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Кол-во проектов ГЧП	371	312	381	475	326	215
Общие инвестиции, млрд руб.	413,3	420,4	490,1	924,4	955,4	2 300
Частные инвестиции, млрд руб.	253,5	279,5	418,7	561,3	619,9	1 800
Доля частного капитала в общем объеме инвестиций, %	61,34	66,48	85,43	60,72	64,88	78,26

повышением барьеров для частного капитала.

Несмотря на снижение количества проектов, суммарный объем инвестиций растет – с 413,3 млрд руб. в 2019 г. до рекордных 2,3 трлн руб. в 2024 г. (+456 %). Резкий скачок в 2022–2024 гг. указывает на концентрацию инвестиций в крупные капиталоемкие проекты (в транспортной инфраструктуре, энергетике, ЖКХ). Такой тренд говорит о смещении фокуса ГЧП с большого числа небольших инициатив к масштабным инфраструктурным проектам федерального и регионального значения. Доля частных инвестиций варьируется от 61,3 % в 2019 г. до 85,4 % в 2021 г.: рост в 2020–2021 гг. может отражать интерес бизнеса к долгосрочным инвестициям в стабильные сегменты экономики. Снижение доли в 2022 г. (60,7 %) объясняется увеличением государственного участия для стабилизации экономики в условиях внешнего давления. В 2024 г. частные инвестиции достигли 1,8 трлн руб. (78,3 % общего объема), что свидетельствует о возврате доверия инвесторов и усилении роли бизнеса в инфраструктурных проектах.

В качестве ключевых тенденций можно выделить следующее.

1. Укрупнение проектов: меньшее количество соглашений сопровождается кратным ростом их стоимости.

2. Рост роли частного капитала: несмотря на колебания, доля частных инвестиций остается высокой (среднее за шесть лет – около 69 %).

3. Реакция на кризисы: пандемия, геополитическая нестабильность и макроэкономические факторы напрямую отражаются на чис-

ле проектов, но не препятствуют увеличению объема вложений.

4. Фокус на стратегических сферах: энергетика, транспорт, жилищно-коммунальное хозяйство (ЖКХ) и цифровая инфраструктура становятся приоритетами.

Следует отметить, что за весь рассматриваемый период наибольшее количество реализованных проектов – 2 907 соглашений на 1,3 трлн руб. (85 %) – приходится на муниципальный уровень. Лидерами по количеству ГЧП и МЧП проектов среди федеральных округов являются Приволжский и Дальневосточный – 782 и 769 проектов соответственно [6].

Обобщая вышесказанное, необходимо сделать следующие выводы.

1. Российский рынок ГЧП и МЧП переходит от экстенсивного роста (множество малых проектов) к интенсивному развитию за счет масштабных инвестиционных соглашений.

2. Несмотря на макроэкономические вызовы, объем частных инвестиций продолжает расти, что говорит о высоком интересе бизнеса к долгосрочным проектам с гарантированной окупаемостью.

3. Снижение числа проектов в 2023–2024 гг. не свидетельствует о кризисе ГЧП и МЧП: напротив, рынок становится более зрелым и ориентируется на капиталоемкие проекты федерального уровня.

4. Для муниципального уровня это означает необходимость разработки механизмов привлечения частного капитала в локальные проекты на фоне конкуренции за ресурсы с

крупными федеральными программами.

Таким образом, государственно-частное партнерство и муниципально-частное партнерство представляют собой эффективный инструмент привлечения частного капитала и управленческих компетенций в сферу реализации инфраструктурных и социальных проектов в тех или иных российских территориях. Необходимо и дальше развивать в нашей

стране такие формы партнерства между публичной властью и бизнесом, учитывая такие преимущества ГЧП и МЧП перед традиционными формами бюджетного финансирования, как распределение рисков между сторонами, долгосрочный характер обязательств, а также возможность использования инновационных финансовых механизмов и проектного финансирования.

### Список литературы

1. Аналитический дайджест «Государственно-частное партнерство в России: итоги 2023 года и основные тренды» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://data.tedo.ru/publications/ppp-digest.pdf>.
2. Буканов, А.Э. Формы муниципально-частного партнерства / А.Э. Буканов // Альманах «Атояновские чтения» : сборник статей по итогам международной научно-практической конференции, посвященной памяти профессора В.Р. Атояна. – 2024. – С. 140.
3. Ильичева, М.Д. Муниципально-частное партнерство: проблемы и пути решения / М.Д. Ильичева // Молодой исследователь: вызовы и перспективы : сборник статей по материалам CCCXLI международной научно-практической конференции. – 2024. – С. 235.
4. Кожевникова, П.С. Факторы и условия, сдерживающие развитие института государственно-частного и муниципально-частного партнерства в России / П.С. Кожевникова // Молодой ученый. – 2022. – № 52(447). – С. 106.
5. Кузьяшев, А.Н. Умное ЖКХ как часть концепции умного города / А.Н. Кузьяшев, К.В. Сария // Эпоха науки. – 2020. – № 24. – С. 214–216.
6. Кузьяшев, А.Н. Подходы к классификации, типологии систем управления государственными (муниципальными) учреждениями и механизм их функционирования / А.Н. Кузьяшев, Э.А. Гумеров, Ю.Я. Рахматуллин, Е.И. Меньшиков // Наука и бизнес: пути развития. – 2025. – № 1(163). – С. 95–99.
7. О государственно-частном партнерстве, муниципально-частном партнерстве в Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федеральный закон от 13.07.2015 № 224-ФЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_182660](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_182660).

### References

1. Analiticheskiy daydzhest «Gosudarstvenno-chastnoye partnerstvo v Rossii: itogi 2023 goda i osnovnyye trendy» [Electronic resource]. – Access mode : <https://data.tedo.ru/publications/ppp-digest.pdf>.
2. Bukanov, A.E. Formy munitsipal'no-chastnogo partnerstva / A.E. Bukanov // Al'manakh «Atoyanovskiye chteniya» : sbornik statey po itogam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati professora V.R. Atoyana. – 2024. – S. 140.
3. Il'icheva, M.D. Munitsipal'no-chastnoye partnerstvo: problemy i puti resheniya / M.D. Il'icheva // Molodoy issledovatel': vyzovy i perspektivy : sbornik statey po materialam CCCXLI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – 2024. – S. 235.
4. Kozhevnikova, P.S. Faktory i usloviya, sderzhivayushchiye razvitiye instituta gosudarstvenno-chastnogo i munitsipal'no-chastnogo partnerstva v Rossii / P.S. Kozhevnikova // Molodoy uchenyy. – 2022. – № 52(447). – S. 106.
5. Kuzyashev, A.N. Umnoye ZHKKH kak chast' kontseptsii umnogo goroda / A.N. Kuzyashev, K.V. Sariya // Epokha nauki. – 2020. – № 24. – S. 214–216.
6. Kuzyashev, A.N. Podkhody k klassifikatsii, tipologii sistem upravleniya gosudarstvennymi (munitsipal'nymi) uchrezhdeniyami i mekhanizm ikh funktsionirovaniya / A.N. Kuzyashev, E.A. Gumerov, YU.YA. Rakhmatullin,

Ye.I. Men'shikov // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2025. – № 1(163). – S. 95–99.

7. О государственном-частном партнерстве, муниципальном-частном партнерстве в Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федеральный закон от 13.07.2015 № 224-ФЗ [Electronic resource]. – Access mode : [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_182660](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_182660).

---

© А.Н. Кузьяшев, Ю.Я. Рахматуллин, Э.А. Гумеров, Е.И. Меньшиков, 2026

УДК 338.242:330.341

Е.И. УТКИНА, А.А. БАТУЕВА

УВО «Университет управления «ТИСБИ», г. Казань

## ИНСТРУМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВЫМ РАЗВИТИЕМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НА ПРИНЦИПАХ ESG

*Ключевые слова:* веб-платформа; корпоративное управление; образовательное учреждение; принципы ESG; студенческое сообщество; устойчивое развитие; цифровые инструменты.

*Аннотация.* Цель – разработать цифровые и маркетинговые инструменты управления устойчивым развитием образовательного учреждения на принципах ESG. Задачи: охарактеризовать взаимосвязь устойчивого развития и принципов ESG; выявить проблему внедрения ESG образовательными учреждениями; разработать платформу для систематизации и продвижения проектов в контексте ESG. Методы: теоретическое обоснование внедрения ESG, моделирование диаграммы «сущность-связь» при разработке веб-платформы. Гипотеза: внедрение принципов ESG в образовательном учреждении будет результативнее, если использовать цифровые и маркетинговые инструменты для популяризации и реализации студенческих проектов. Результаты: представлена модель платформы «Сайлау» для продвижения проектов студенческого сообщества экологической направленности (E) и социальной устойчивости (S), служащая повышению уровня корпоративного управления (G) в вузе вследствие цифровизации.

Современный тренд на устойчивость развития экономических систем сопряжен с поступательной трансформацией экономики, экологии и социума, которая направлена не только на поддержание уровня и качества жизни текущего поколения, но и на сохранение их для будущих поколений в долгосрочной перспективе. В этой связи менеджмент отдельных компаний эволюционирует в направлении принятия перспективных решений с учетом возможного влияния

на социум и среду, что в таком случае отвечает триаде принципов ESG – экологической, социальной и корпоративной ответственности бизнеса при принятии решений [2]. Если для зарубежных предприятий различного уровня практика рейтингования бизнеса по каждому аспекту ESG является распространенной, а ее результаты учитываются при принятии инвестиционных решений, то для российской действительности следование принципам ESG характерно преимущественно для крупных корпораций [3].

Именно на примере российских компаний железнодорожного, нефтедобывающего, металлообрабатывающего секторов экономики Г.Р. Гарипова, Е.И. Уткина, Л.Д. Капранова, О.А. Полищук, В.В. Погодина и другие приводят примеры реализации принципов ESG. В большинстве случаев они реализуются в виде экологических проектов с использованием «зеленых» технологий, направленных на сокращение выбросов и отходов, снижение потребления ресурсов, модернизацию производств, получение продукции, безопасной для климата, среды и граждан [1; 3; 4]. Отражение деятельности компаний в направлении устойчивого развития и ESG-повестки в программах и проектах, требующих инвестиций, позволяет направлять приоритетное финансирование на ESG-решения. В то же время недостаточно исследований, направленных на реализацию принципов ESG образовательными учреждениями, которые, в свою очередь, являются источником формирования у студенческого сообщества внимательного отношения к тенденциям устойчивого экологического, экономического, социального развития.

В данном исследовании демонстрируется опыт реализации принципов ESG на базе Университета управления «ТИСБИ» с применени-

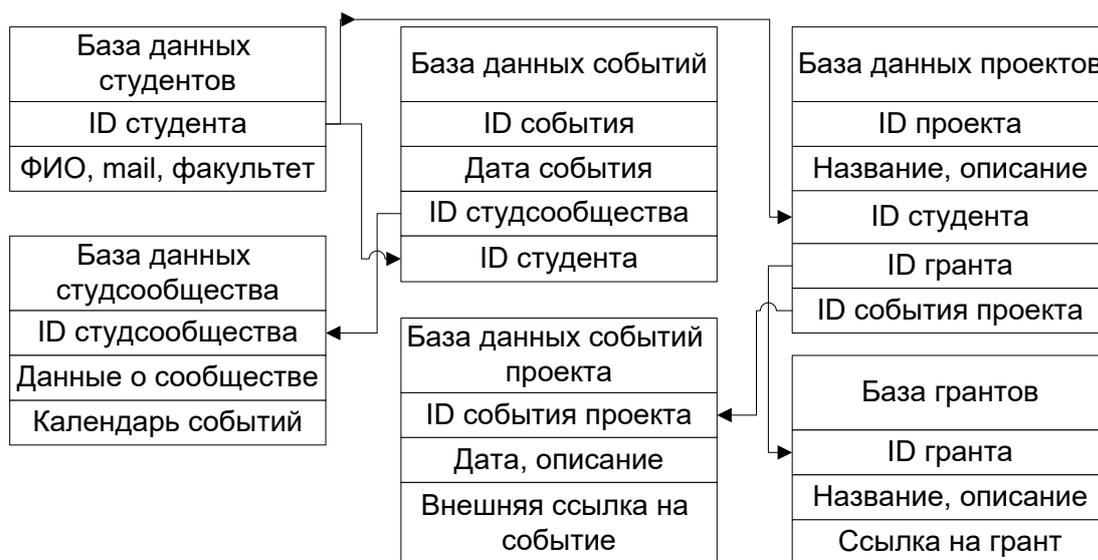


Рис. 1. Диаграмма «сущность-связь» платформы «Сайлау» (разработано авторами)

ем маркетинговых и цифровых инструментов продвижения и поддержки проектов экологической и социальной направленности. В качестве цифровой поддержки выступает создание платформы «Сайлау» (с тат. яз. – выбор), которая служит интересам оперативной информационной поддержки и увязыванию всех процессов функционирования ранее существующего в вузе одноименного студенческого научного общества (рис. 1).

На рис. 1 представлена модель веб-платформы в виде диаграммы «сущность-связь». Модель имеет ряд блоков – базы студентов, студенческих сообществ, событий, проектов, событий проекта, грантов. Блок «базы данных студентов» отражает данные студентов, которые могут единолично или группой вовлекаться в одно или несколько студенческих событий; блок «студенческое сообщество» характеризует группу студентов, нацеленных на реализацию одного события на принципах ESG. И таких сообществ может быть несколько. Одно сообщество может исполнять несколько проектов, каждый из которых может объединять ряд событий. Грант может быть направлен на реализацию нескольких проектов или событий на принципах ESG.

Событийный блок организован с привлечением инструментов маркетинга для продвижения информации к ее потребителю [5]. Так, данный блок централизует информацию о мероприятиях, например, социально-эколо-

гической направленности, повышает уровень осведомленности студентов и их сообществ о внутренних и внешних ESG-инициативах вуза, служит активизации познавательного интереса и вовлеченности студенческих сообществ в мероприятия. В блоках моделей с базами проектов и грантов предусмотрена возможность перехода по внешним ссылкам для получения оперативных данных об источниках и мерах финансовой поддержки ESG-инициатив на региональном и государственном уровне.

Платформа «Сайлау» направлена на повышение прозрачности взаимодействия корпоративного менеджмента вуза (G) со студенчеством, интенсификацию вовлеченности социума (студентов) (S) в исследовательскую и проектную работу в рамках вузовских мероприятий и грантов с внешним финансированием социальной (S) и экологической тематики (E). Наличие такой платформы цифровой и маркетинговой поддержки устойчивого развития вуза на принципах ESG позволяет устранить ранее существовавшие проблемы деятельности студенческих научных сообществ в отсутствии платформы, такие как:

- недостаточное продвижение информации о ESG-проектах – как уже реализованных в вузе, так и перспективных, среди студентов;
- малая осведомленность и вовлеченность обучающихся в деятельность студенческих сообществ, успешно реализующих ESG-

проекты;

- отсутствие динамичного обновления данных о перспективных проектах социально-экологической направленности и их грантовой поддержке;

- недостаточная популяризация успешного исполнения грантов регионального и федерального уровня, молодежных конкурсов, волонтерской деятельности.

Разработка платформы направлена на устранение вышеперечисленных недостатков и служит агрегации данных о социально-экономических проектах и их финансировании, популяризации ESG-повестки в вузовской среде, продвижению информации о проектах среди студентов и их сообществ, стимулированию инициативности, вовлеченности, ответственности студентов при решении задач устойчивого развития.

Таким образом, предлагаемая платформа «Сайлау», разработанная с применением маркетинговых и цифровых инструментов управ-

ления устойчивым развитием образовательного учреждения на принципах ESG, направлена на повышение:

- экологического влияния (*E*) через продвижение проектов устойчивого развития и стимулирование исследований в области экологии и «зеленых» технологий;

- социальной устойчивости (*S*) через интенсификацию вовлеченности студентов в жизнь университета, усиление горизонтальных связей, поддержку их инициатив и лидерства;

- уровня корпоративного управления (*G*) посредством наращивания прозрачности процессов, цифровизации академической среды, эффективного распределения ресурсов на поддержку инноваций.

Дальнейшие исследования будут направлены на оценку затрат на функционирование платформы и результатов ее работы, выявление экономической эффективности предложенных инструментов реализации ESG принципов в вузе.

### Список литературы

1. Гарипова, Г.Р. Актуальность и значение ESG-концепции для российских предприятий в условиях экономики замкнутого цикла / Г.Р. Гарипова, Е.И. Уткина // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Экономика и управление. – 2023. – № 1(56). – С. 79–87.
2. Гончарова, Н.А. Успех в современном бизнесе: эволюция и современные тенденции менеджмента / Н.А. Гончарова, А.А. Ошкордина, А.И. Хаитова // Наука и бизнес: пути развития. – 2025. – № 6(168). – С. 149–151.
3. Капранова, Л.Д. ESG-трансформация как парадигма устойчивого развития экономики России / Л.Д. Капранова, О.А. Полищук // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15. – № 3.
4. Погодина, В.В. Формирование устойчивой экономики России посредством привлечения активных «зеленых» инвестиций – новый вектор в обеспечении экономической безопасности страны / В.В. Погодина, Т.М. Редькина, Д.Х. Сабанчиева // Глобальный научный потенциал. – 2025. – № 6(171). – С. 357–360.
5. Сергеева, Е.А. Менеджмент и маркетинг. Основы маркетинга : учебное пособие / Е.А. Сергеева, А.С. Брысаев. – Казань : КГТУ, 2010. – 162 с.

### References

1. Garipova, G.R. Aktual'nost' i znachenije ESG-kontseptsii dlya rossiyskikh predpriyatij v usloviyakh ekonomiki zamknutogo tsikla / G.R. Garipova, Ye.I. Utkina // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Ekonomika i upravleniye. – 2023. – № 1(56). – S. 79–87.
2. Goncharova, N.A. Uspekh v sovremennom biznese: evolyutsiya i sovremennyye tendentsii menedzhmenta / N.A. Goncharova, A.A. Oshkordina, A.I. Khaitova // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2025. – № 6(168). – S. 149–151.
3. Kapranova, L.D. ESG-transformatsiya kak paradigma ustoychivogo razvitiya ekonomiki Rossii / L.D. Kapranova, O.A. Polishchuk // Vestnik yevraziyskoy nauki. – 2023. – T. 15. – № 3.
4. Pogodina, V.V. Formirovaniye ustoychivoy ekonomiki Rossii posredstvom privlecheniya

aktivnykh «zelenykh» investitsiy – novyy vektor v obespechenii ekonomicheskoy bezopasnosti strany / V.V. Pogodina, T.M. Red'kina, D.KH. Sabanchiyeva // Global'nyy nauchnyy potentsial. – 2025. – № 6(171). – S. 357–360.

5. Sergeyeva, Ye.A. Menedzhment i marketing. Osnovy marketinga : uchebnoye posobiye / Ye.A. Sergeyeva, A.S. Brysayev. – Kazan' : KGTU, 2010. – 162 s.

---

© Е.И. Уткина, А.А. Батуева, 2026

---

## Abstracts and Keywords

*O.L. Boziev, M.B. Gubashiev*

### **Approximation of Solutions to the Hopf Equation by Solutions to the Associated Loaded Equation**

*Keywords:* approximations; sequences of a function; nonlinear differential equation; Hopf equation; reduction.

*Abstract.* The research objective is to study methods of reducing nonlinear differential equations to forced equations and integral forms for constructing approximate solutions, illustrated by the quasilinear Hopf equation. The research tasks are to consider direct and repeated reductions of the equation with substitution of the unknown function, to investigate reduction via integral transformation, to construct sequences of approximate solutions using an iterative method, and to analyze their dynamics. The research hypothesis suggests that the reduction of the Hopf nonlinear equation to forced and integral forms, combined with an iterative process, allows the construction of approximate solutions that adequately describe the dynamics of the original problem. Research methods included direct reduction and linearization of the equation, integration using the mean value theorem for integrals, iterative method of successive approximations, and computation and visualization using the Maple software package. The findings are as follows: reduction algorithms were developed and the first three approximate solutions were constructed, exhibiting distinct behaviors: rapid decay, transition into negative values, and growth. It was shown that integral and weighting terms significantly affect the divergence of approximations, which should be considered when interpreting results. The obtained sequences of approximations enable analysis of the dynamics of processes described by nonlinear differential equations.

---

*T.V. Bychkova, D.A. Bezik*

### **Modeling the Damping Properties of Two-Layer Coatings on a Cylindrical Substrate**

*Keywords:* vibration damping; MATLAB modeling; finite difference method; multilayer coatings; transition zones; and cylindrical shells.

*Abstract.* The purpose of the study is to create a mathematical model to assess the influence of transition zones between the coating layers on the damping properties of a cylindrical structure. The study is based on the hypothesis that interfacial transition regions have a higher energy dissipation coefficient compared to bulk materials. The research methodology involves one-dimensional modeling of radial vibrations in a viscoelastic composite cylinder. The numerical solution of the problem is obtained using the finite difference method with time integration based on the Verlet algorithm. The results of numerical modeling conducted in the MATLAB environment confirmed that the properties of transition zones must be taken into account to adequately assess and optimize the damping properties of multilayer coatings.

---

*A.I. Karachentsev, P.L. Voronov*

### **Mathematical Modeling of Strength and Life Characteristics of Hydrogen Electric Powertrains under Aviation Loads: Numerical Approach and Software Implementation**

*Keywords:* aircraft loads; hydrogen power plant; mathematical modeling; software package; strength; resource; numerical methods; electric propulsion system.

*Abstract.* The article considers a comprehensive methodology for mathematical modeling of the strength and life of hydrogen electric powertrains (HEP) for aviation applications. The main focus is on

---

a numerical approach that integrates multiphysics modeling of working processes, analysis of the stress-strain state of critical components (hydrogen storage tanks, fuel cells, control systems) and assessment of their low-cycle and high-cycle fatigue under loads typical for aviation. The architecture of a specialized software package implementing the proposed methodology is presented. The results of verification calculations demonstrating the influence of flight cycle parameters on the residual life of a high-pressure composite cylinder wall are given. The effectiveness of the developed tool for optimizing HEP structures at the early design stages is shown.

---

*I.V. Furkalo, O.M. Anshakov*

### **Automatic Text Authorship Identification Using Sound Profile**

*Keywords:* phonetic transcription; poetic text processing; Russian language; Python; computational linguistics; NLP.

*Abstract.* This article is devoted to the development of a method for automatic text attribution based on the analysis of their phonetic patterns. To test the hypothesis of the existence of a stable phonetic idiolect for an author, an algorithm for constructing and comparing sound profiles was implemented. An experiment on a corpus of works by nine Russian poets demonstrated correct attribution in 67 % of cases, confirming the method's potential, especially for texts of considerable length. The results contribute to the development of phonetic stylometry and provide a foundation for tools for analyzing author style.

---

*I.V. Furkalo, O.M. Anshakov*

### **Development of a Phonetic Transcriber for a Russian Text in the Python Language**

*Keywords:* phonetic transcription; processing of poetic texts; Russian language; automatic stress detection; vowel reduction; iotated vowels; positional consonant changes; Python; NLP; computational linguistics.

*Abstract.* The article presents a system for the automatic phonetic transcription of a Russian text, implemented in the Python programming language. The system solves a set of interrelated natural language processing tasks, including automatic stress position detection using morphological analysis, reduction of unstressed vowels according to the norms of modern Russian literary pronunciation, transformation of iotated vowels, positional consonant voicing and devoicing, and consonant softening before certain vowels. The article details the system's architecture, mathematical models of key algorithms, and provides a comparative analysis with existing solutions. The conducted verification demonstrates the effectiveness of the proposed approach for computational linguistics and digital humanities tasks.

---

*E.I. Ignatova, I.S. Frolov, F.V. Svoikin*

### **Algorithm for Modeling a Six-Square Truncated Pyramid Using KOMPAS-3D V23**

*Keywords:* engineering graphics; descriptive geometry; KOMPAS-3D; truncated pyramid; orthogonal projections; axonometry; surface net; ESKD; GOST; teaching methodology.

*Abstract.* The article presents a detailed methodology for performing graphic work on constructing a truncated hexagonal pyramid in the KOMPAS-3D V23 computer-aided design system. The complete sequence of actions is considered: from preparing an A3 format with GOST 2.304-68 and 2.104-68 compliant design to constructing a set of orthogonal projections (horizontal, frontal, profile), determining the true size of a section using the method of replacing projection planes, constructing an axonometric projection (isometry), and developing a surface net. Special attention is paid to the rules

---

for dimensioning, choosing line types and thicknesses, and the logic of projection connection between views. The methodology is aimed at students of technical specialties, and is designed to develop practical skills in CAD, deepen knowledge in descriptive geometry, and foster spatial thinking within the educational course of engineering graphics.

---

*O.O. Gorshkova, E.A. Bryzgalova, M.E. Lyushnenko*

### **Possibilities of Modernization of the Technological Process of Extraction of Recoverable Isobutylene**

*Keywords:* recoverable isobutylene; petrochemistry; distillation column; catalyst.

*Abstract.* The study aimed to propose a solution to modernize the technological process of extraction of recoverable isobutylene, aimed at increasing the yield of isobutylene and reducing its losses. Research methods included examination, analysis and synthesis of specialized literature, research, scientific publications on the problem under consideration; analysis and comparison of existing technologies, practical experience; process modeling using software: Aspen Hysys, Aspen Plus, Pro II. Possible risks in the implementation of the proposed solution have been identified, and methods for minimizing them have been identified. The effectiveness of the proposed solutions based on technical and economic calculations is substantiated.

---

*N.V. Saveliev, L.S. Vorobyeva, A.N. Saveliev*

### **Feasibility Study for the Design, Production and Implementation of a Training Industrial Robot**

*Keywords:* training industrial robot; feasibility study; educational robotics; financial modeling; import substitution; investment analysis.

*Abstract.* The purpose of the paper is to substantiate the need for the development and production of a five-axis industrial training robot for effective personnel training. The relevance of the project is due to the growing demand for the training of qualified personnel in the field of robotics and automation in the context of import substitution. The task is to present a comprehensive feasibility study (feasibility study) of a project for the development and production of a five-axis industrial training robot. The hypothesis is that the development of a domestic five-axis industrial training robot with a modular design and adapted software, costing 30–50 % lower than imported analogues, will allow it to occupy a stable market niche and significantly increase the effectiveness of personnel training in the field of robotics by ensuring the availability of modern practical equipment. The methods are an integrated approach that integrates methods of strategic analysis, financial modeling, and risk management. The study resulted in the development of a financial model that combines a forecast of production and sales of 170 units in 2026, calculation of investment and operating costs, assessment of cash flows and key performance indicators.

---

*I.V. Chernetsov, M.P. Potapov*

### **Development and Testing of a Prototype for a Robotic Training Simulator with Automated Control of SHOTI Scale Parameters**

*Keywords:* robotic mannequin; difficult airway; tracheal intubation; Mallampati score; additive technologies; medical education; simulation-based training.

*Abstract.* Inadequate preparation for the “difficult airway” (DA) scenario is a leading cause of complications related to upper airway management, particularly in the pre-hospital setting. Existing training simulators do not provide comprehensive and precisely adjustable changes to anatomical parameters across a wide range of metrics assessed by the standard Preoperative Airway Difficulty Assessment Scale. It is a comprehensive assessment scale, which assesses the following parameters: mandibular protrusion, neck flexion (in degrees), thyromental distance, sternomental distance,

---

anamnesic data (sleep apnea, previous difficult intubation), clinical data (neck length, obesity), and Mallampati score.

The goal of the described R&D project was to develop and test a prototype of a robotic training complex that enables automated, independent, and precise adjustment of all simulated anatomical parameters of the assessment scale. Anatomically accurate 3D models were created based on MSCT data from a volunteer with the assessment scale of 0. Bone structures were fabricated using FDM printing from ABS plastic, while soft tissues were made using silicone casting with differentiated hardness (Shore 15–40). A three-tier control architecture was developed (PC client, Orange Pi Zero 2W server, STM32 microcontrollers) along with a proprietary communication protocol. A system of 8 linear actuators based on NEMA 17 stepper motors and stepper motor drivers enables adjustment of the following parameters: neck mobility (6 gradations in 10-degree increments), mouth opening (6 gradations), jaw protrusion (4 gradations), thyromental distance (6 gradations), Mallampati visualization (4 gradations), neck length (4 gradations), and lateral laryngeal displacement left/right (4 gradations). In addition to modeling anatomical parameters, the phantom features an operator-controlled regurgitation function. The complex is equipped with a feedback system that registers lung ventilation, gastric insufflation, and dental contact.

As a result, a prototype trainer was created, allowing for the software-based configuration of approximately 55,296 unique anatomical combinations of assessment scale parameters. Preliminary testing involving 5 experienced anesthesiologists confirmed the prototype's basic anatomical realism and the correct operation of all feedback systems. Subjectively, all experts noted that the complex's prototype is functionally on par with the commercial counterpart, the Laerdal SimMan 3G, due to the full automation of Mallampati parameters.

The developed complex represents a novel solution for simulation-based training, being the first to provide comprehensive and automated control over all simulated parameters of the Mallampati score. High anatomical accuracy and an objective feedback system create a standardized and reproducible environment for the development and assessment of practical skills.

---

*E.V. Lyapunsova, L.G. Amirkhanyan*

### **Using Machine Learning and Fuzzy Logic to Build a Hybrid Defect Detection System**

*Keywords:* visual inspection; hybrid intelligent system; defect detection; machine learning; fuzzy logic.

*Abstract.* The relevance of the research is determined by the need to ensure the stable operation of industrial diagnostic systems in a non-stationary production environment characterized by noisy data, variable shooting conditions, and ambiguous defects. The goal is to develop and justify a hybrid architecture for defect classification that combines the advantages of convolutional neural networks and fuzzy logic to improve the stability of solutions in complex conditions. First, the capabilities and limitations of standard machine learning methods, such as convolutional neural networks (CNNs), which are most commonly used in image processing, are analyzed. To overcome these limitations, a hybrid architecture is proposed that combines the ability of CNNs to extract features with the ability of fuzzy logic to process imprecise signals from multiple local classifiers and aggregate them to obtain a final decision. The article provides a mathematical justification and description of the hybrid model based on the application of fuzzy set theory and fuzzy logical inference methods.

---

*M.N. Belaya, A.A. Gaag*

### **Analysis of the Processes of Creating Executive Documentation in Construction and Prospects for Using Energy Saving Tools in Construction**

*Keywords:* tools for lean construction; executive documentation; and information modeling technologies; last planner system; value stream mapping.

*Abstract.* The article is devoted to the analysis of the processes of executive documentation

---

formation in the construction industry, their role in ensuring the quality and compliance of the completed works with the project requirements. Special attention is paid to modern trends and methods of optimizing these processes to improve the efficiency of construction project management. The purpose of this article is to analyze the processes of creating executive documentation in construction, identify the main problems and their solutions, and determine the prospects for using lean construction tools to improve the efficiency and quality of executive documentation. The research hypothesis is that the introduction of modern information technologies and lean construction tools into the processes of executive documentation formation significantly increases their efficiency, reducing time, labor costs, and the volume of document circulation, and contributes to the adaptation of processes to the dynamics of modern construction projects.

The scientific methods used in this study include analysis, generalization, and synthesis. The main result of the work is the confirmation of the high efficiency of the implementation of information modeling technologies (ITM) and IT services in the processes of generating executive documentation in construction, which significantly reduces time and costs, increases labor productivity, and improves the overall adaptability and competitiveness of construction projects.

---

*V.G. Pesterev, V.A. Kharakhinov*

### **Automation of Enterprise IT-Infrastructure Based on DevOps Methodology: Architectural Analysis and Adaptive Implementation Model**

*Keywords:* DevOps; automation; IT infrastructure; CI/CD; containerization; observability; architectural model; software lifecycle.

*Abstract.* The paper investigates the problem of increasing the efficiency of the software life cycle in the context of dynamic digital transformation. DevOps methodology is considered as a comprehensive approach to integrating development and operations processes. The aim of the study is to develop an adaptive architectural model for IT infrastructure automation based on DevOps principles. A method of limited decomposition of implementation stages is proposed, consisting in the allocation of two automation circuits: basic and extended. For each circuit, key components, efficiency criteria and risks are formalized. A comparative analysis of deployment architecture options is carried out based on multi-criteria evaluation. The developed model is illustrated on a practical implementation scenario for a typical web system. The research results show that the proposed two-level model allows achieving a statistically significant reduction in the change cycle time by 65–80 % and a reduction in the share of problematic releases by 40–60 % while maintaining manageable operational complexity.

---

*Yu.A. Trofimova, O.L. Pererva*

### **Digital Twins as a Tool for Industrial Production Improvement**

*Keywords:* digital twins; industrial production; digitalization; production processes; production optimization; quality control; production efficiency.

*Abstract.* The purpose of this article is to study digital twins as an innovative tool for improving industrial production in the context of the digital transformation of the economy. The purpose of this article is to analyze the practical application of digital twin technology to optimize production processes, increase efficiency, and control product quality. The hypothesis of the study is that the introduction of digital twins contributes to a significant improvement in production performance and competitiveness of industrial enterprises. In the course of the research, theoretical methods were used: analysis of scientific literature, generalization of practical experience in the introduction of digital twins in various industries, systematization of data on the use of technology in production processes. As a result of the research, the key advantages of using digital twins in industry were identified, the main directions of their application were identified, as well as the problems and prospects for further development of this technology.

### **Methods of Spectral Mapping of Scintillation Detector Data and Classification of the Composition of Local Inclusions**

*Keywords:* collimation; Compton scattering; effective atomic number; energy spectrum; gamma spectrometry; photoelectric effect; radiation attenuation; scintillation detectors.

*Abstract.* The purpose of the study is to assess the applicability of attenuation spectrometry of external photon radiation for classifying the composition of local inclusions by changes in the energy spectrum. The objectives of the article are to justify informative spectral features, to define requirements for the source, measurement geometry and detector module, and to identify factors limiting accuracy. The study uses a physical and engineering analysis of radiation–matter interaction mechanisms, an assessment of counting uncertainty, and a comparative analysis of scintillation detectors (NaI(Tl), CsI(Tl), LaBr<sub>3</sub>(Ce)) and readout options. It is shown that, at the first stage, it is reasonable to apply two-window spectral criteria and a differential measurement scheme; recommendations are formulated for selecting the energy range and for the stages of practical implementation of a compact measuring system.

---

*M.V. Batyukov, V.A. Grechushkin, V.M. Kravchenko, G.I. Polennikova*

### **A3 Methodology as a Tool for Improving the Effectiveness of Project Implementation**

*Keywords:* A3 methodology; Ishikawa diagram; "5 why" method; Pareto diagram; A3 project implementation stages; AZ format; KPI of the project.

*Abstract.* The purpose of the study is to review and analyze the main provisions of the implementation of efficiency improvement projects in accordance with the A3 methodology. To achieve the purpose of the study, the tasks are set: to establish the procedure for implementing efficiency improvement projects using the A3 methodology; to describe the conditions for the opening and stages of the implementation of A3 projects, including using tools (Ishikawa diagram, the "5 why" method, Pareto diagram). The study used methods of comparative, logical, graphical, economic and statistical analysis. The hypothesis of the study establishes the impact of the active application of the A3 methodology in the company on the possibilities of improving the operational efficiency of project implementation. As the results achieved, the stages of implementation of A3 projects are detailed with a description of the work being carried out and a graphical analysis of the current situation (by base and target levels) and access to key performance indicators (KPIs) of the project.

---

*B.N. Zhigzhitova, A.O. Aiusheeva, A.I. Grigorieva*

### **Development of Cross-Border Cooperation in the Far East Regions: The Case of Primorsky Krai**

*Keywords:* Far Eastern Federal District; Primorsky Krai; cross-border cooperation; foreign economic activity; foreign trade turnover; exports; and imports.

*Abstract.* The article examines the cross-border cooperation of the Far Eastern regions on the example of Primorsky Krai, the analysis of foreign economic activity of Primorsky Krai, the main directions of export and import and prospects of cross-border cooperation. The purpose of the study: to consider cross-border cooperation on the example of Primorsky Krai. Research hypothesis suggests that the influence of geographical location on the development of cross-border cooperation. Research methods are analysis and comparison. The findings are as follows: the analysis of foreign economic activities in Primorsky Krai has shown that the most effective interaction and cooperation takes place with border territories.

---

*A.N. Kuzyashev, Yu.Ya. Rakhmatullin, E.A. Gumerov, E.I. Menshikov*

### **Mechanisms for Implementing and Trends in the Development of Public-Private Partnerships and Municipal-Private Partnerships**

*Keywords:* public-private partnership (PPP); municipal-private partnership (MPP); concession agreement; service contract; investment agreement.

*Abstract.* The goals and objectives of the study are to conduct a comparative analysis of public-private partnerships (PPPs) and municipal-private partnerships (MPPs). The results of the study include a comprehensive analysis of the potential and limitations of using PPPs and MPPs in state and municipal investment policies, as well as the justification of trends and suggestions for their development in Russia using constructive, abstract-logical, monographic, and other methods.

---

*E.I. Utkina, A.A. Batueva*

### **Tools for Managing Sustainable Development of an Educational Institution Based on ESG Principles**

*Keywords:* Web platform; corporate governance; educational institution; ESG principles; student community; sustainable development; digital tools.

*Abstract.* The objective is to develop digital and marketing tools for managing the sustainable development of an educational institution based on ESG principles. The research tasks are to characterize the relationship between sustainable development and ESG principles; to identify the problem of ESG implementation by educational institutions; to develop a platform for systematizing and promoting projects in the ESG context. Methods included theoretical justification for ESG implementation, modeling the entity-relationship diagram during the development of the web platform. The hypothesis suggests that the implementation of ESG principles in an educational institution will be more effective if digital and marketing tools are used to popularize and implement student projects. Results are as follows: the article presented a model of the "Sailau" platform for promoting student community projects focused on ecology (E) and social sustainability (S), which serves to improve the level of corporate governance (G) at the university due to digitalization.

---

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ List of Authors

**О.Л. БОЗИЕВ**

кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела МСЭП Института информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра РАН; доцент кафедры компьютерных технологий и информационной безопасности Кабардино-Балкарского государственного университета имени Х.М. Бербекова, г. Нальчик

**E-mail:** boziev@yandex.ru

**O.L. BOZIEV**

Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Senior Researcher, Department of Multimodal Economics and Social Policy, Institute of Informatics and Problems of Regional Management, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor, Department of Computer Technologies and Information Security, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov, Nalchik

**E-mail:** boziev@yandex.ru

**М.Г. ГУБАШИЕВ**

аспирант Кабардино-Балкарского государственного университета имени Х.М. Бербекова, г. Нальчик

**E-mail:** gubashi@yandex.ru

**M.G. GUBASHIEV**

Postgraduate Student, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov, Nalchik

**E-mail:** gubashi@yandex.ru

**Т.В. БЫЧКОВА**

кандидат педагогических наук, доцент кафедры автоматизации, физики и математики Брянского государственного аграрного университета, с. Кокино

**E-mail:** tanyabychkova@mail.ru

**T.V. BYCHKOVA**

Candidate of Science (Pedagogy), Associate Professor, Department of Automation, Physics, and Mathematics, Bryansk State Agrarian University, Kokino

**E-mail:** tanyabychkova@mail.ru

**Д.А. БЕЗИК**

кандидат технических наук, доцент, директор института энергетики и природопользования Брянского государственного аграрного университета, г. Брянск

**E-mail:** bda20101@yandex.ru

**D.A. BEZIK**

Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Director of Institute of Energy and Nature Management, Bryansk State Agrarian University, Bryansk

**E-mail:** bda20101@yandex.ru

**А.И. КАРАЧЕНЦЕВ**

технический эксперт ZeroAvia Limited, д. Кембл (Англия)

**E-mail:** akarachentcev@gmail.com

**A.I. KARACHENTSEV**

Technical Expert, ZeroAvia Limited, Kemble (England)

**E-mail:** akarachentcev@gmail.com

**П.А. ВОРОНОВ**

кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Федорова Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары

**E-mail:** pvl21@mail.ru

**P.A. VORONOV**

Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Power Supply and Intelligent Electric Power Systems named after A.A. Fedorov, Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary

**E-mail:** pvl21@mail.ru

<p><b>И.В. ФУРКАЛО</b> аспирант Российского государственного гуманитарного университета, г. Москва <b>E-mail:</b> igor.furkalo@gmail.com</p>	<p><b>I.V. FURKALO</b> Postgraduate Student, Russian State University of Humanities, Moscow <b>E-mail:</b> igor.furkalo@gmail.com</p>
<p><b>О.М. АНШАКОВ</b> доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики, логики и интеллектуальных систем Российского государственного гуманитарного университета, г. Москва <b>E-mail:</b> oansh@yandex.ru</p>	<p><b>O.M. ANSHAKOV</b> Doctor of Physics and Mathematics, Professor in the Department of Mathematics, Logic, and Intelligent Systems at the Russian State University for the Humanities, Moscow <b>E-mail:</b> oansh@yandex.ru</p>
<p><b>Е.И. ИГНАТОВА</b> кандидат технических наук, заведующая кафедрой компьютерной графики и информационного права Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, г. Санкт-Петербург <b>E-mail:</b> ignatova22@mail.ru</p>	<p><b>E.I. IGNATOVA</b> Candidate of Sciences (Engineering), Head of Department of Computer Graphics and Information Law, Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg <b>E-mail:</b> ignatova22@mail.ru</p>
<p><b>И.С. ФРОЛОВ</b> кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерной графики и информационного права Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, г. Санкт-Петербург <b>E-mail:</b> frolovtrubach@mail.ru</p>	<p><b>I.S. FROLOV</b> Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Department of Computer Graphics and Information Law, Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg <b>E-mail:</b> frolovtrubach@mail.ru</p>
<p><b>Ф.В. СВОЙКИН</b> кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерной графики и информационного права Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, г. Санкт-Петербург <b>E-mail:</b> svoykin_fv@mail.ru</p>	<p><b>F.V. SVOYKIN</b> Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Department of Computer Graphics and Information Law, Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg <b>E-mail:</b> svoykin_fv@mail.ru</p>
<p><b>О.О. ГОРШКОВА</b> доктор педагогических наук, профессор кафедры нефтегазового дела филиала Тюменского индустриального университета, г. Сургут <b>E-mail:</b> gorchkovaoksana@mail.ru</p>	<p><b>O.O. GORSHKOVA</b> Doctor of Education, Professor, Department of Oil and Gas Engineering, Branch of Tyumen Industrial University, Surgut <b>E-mail:</b> gorchkovaoksana@mail.ru</p>
<p><b>Е.А. БРЫЗГАЛОВА</b> студент филиала Тюменского индустриального университета, г. Сургут <b>E-mail:</b> gorchkovaoksana@mail.ru</p>	<p><b>E.A. BRYZGALOVA</b> Student, Branch of Tyumen Industrial University, Surgut <b>E-mail:</b> gorchkovaoksana@mail.ru</p>
<p><b>М.Э. ЛЮШНЕНКО</b> студент филиала Тюменского индустриального университета, г. Сургут <b>E-mail:</b> gorchkovaoksana@mail.ru</p>	<p><b>M.E. LYUSHNENKO</b> Student, Branch of Tyumen Industrial University, Surgut <b>E-mail:</b> gorchkovaoksana@mail.ru</p>

<p><b>Н.В. САВЕЛЬЕВ</b> кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург <b>E-mail:</b> saveliev@kuz.ru</p>	<p><b>N. V. SAVELIEV</b> Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg <b>E-mail:</b> saveliev@kuz.ru</p>
<p><b>Л.С. ВОРОБЬЕВА</b> кандидат технологических наук, доцент кафедры экономики высокотехнологичных производств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург <b>E-mail:</b> vls.kafedra81@gmail.com</p>	<p><b>L. S. VOROBYEVA</b> Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of High-Tech Production Economics, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg <b>E-mail:</b> vls.kafedra81@gmail.com</p>
<p><b>А.Н. САВЕЛЬЕВ</b> магистрант Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург <b>E-mail:</b> youurple1@gmail.com</p>	<p><b>A.N. SAVELIEV</b> Master's Student, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg <b>E-mail:</b> youurple1@gmail.com</p>
<p><b>И.В. ЧЕРНЕЦОВ</b> ассистент кафедры анестезиологии и реаниматологии; преподаватель кафедры медицины катастроф Ярославского государственного медицинского университета Минздрава России, г. Ярославль <b>E-mail:</b> minasitil314@gmail.com</p>	<p><b>I.V. CHERNETSOV</b> Assistant Lecturer, Department of Anesthesiology and Resuscitation; Lecturer, Department of Disaster Medicine, Yaroslavl State Medical University, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Yaroslavl <b>E-mail:</b> minasitil314@gmail.com</p>
<p><b>М.П. ПОТАПОВ</b> доктор медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой медицинской кибернетики с курсом медицинской информатики Ярославского государственного медицинского университета Минздрава России, г. Ярославль <b>E-mail:</b> simclinic@mail.ru</p>	<p><b>M.P. POTAPOV</b> Doctor of Medicine, Associate Professor, Head of Department of Medical Cybernetics with a Course in Medical Informatics, Yaroslavl State Medical University, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Yaroslavl <b>E-mail:</b> simclinic@mail.ru</p>
<p><b>Л.Г. АМИРХАНИЯН</b> аспирант Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), г. Москва <b>E-mail:</b> amirkhanyan.l@bmstu.ru</p>	<p><b>L.G. AMIRKHANYAN</b> Postgraduate Student, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow <b>E-mail:</b> amirkhanyan.l@bmstu.ru</p>
<p><b>Е.В. ЛЯПУНЦОВА</b> доктор технических наук, профессор кафедры инновационного предпринимательства Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), г. Москва <b>E-mail:</b> lev86@bmstu.ru</p>	<p><b>E.V. LYAPUNTSOVA</b> Doctor of Engineering, Professor, Department of Innovative Entrepreneurship, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow <b>E-mail:</b> lev86@bmstu.ru</p>

<p><b>М.Н. БЕЛАЯ</b> кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности Севастопольского государственного университета, г. Севастополь <b>E-mail:</b> belaya_079@mail.ru</p>	<p><b>M.N. BELAYA</b> Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Technosphere Safety, Sevastopol State University, Sevastopol <b>E-mail:</b> belaya_079@mail.ru</p>
<p><b>А.А. ГААГ</b> аспирант кафедры техносферной безопасности Севастопольского государственного университета, г. Севастополь <b>E-mail:</b> studgaag@gmail.com</p>	<p><b>A.A. GAAG</b> Postgraduate Student, Department of Technosphere Safety, Sevastopol State University, Sevastopol <b>E-mail:</b> studgaag@gmail.com</p>
<p><b>В.Г. ПЕСТЕРЕВ</b> студент Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск <b>E-mail:</b> willfordrockwell@gmail.com</p>	<p><b>V.G. PESTEREV</b> Student, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk <b>E-mail:</b> willfordrockwell@gmail.com</p>
<p><b>В.А. ХАРАХИНОВ</b> кандидат технических наук, доцент Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск <b>E-mail:</b> willfordrockwell@gmail.com</p>	<p><b>V.A. KHARAKHINOV</b> Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk <b>E-mail:</b> willfordrockwell@gmail.com</p>
<p><b>Ю.А. ТРОФИМОВА</b> магистрант Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), г. Москва <b>E-mail:</b> julist7@yandex.ru</p>	<p><b>YU.A. TROFIMOVA</b> Master's Student, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow <b>E-mail:</b> julist7@yandex.ru</p>
<p><b>О.В. ПЕРЕРВА</b> доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой организации и управления производством калужского филиала Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), г. Москва, г. Калуга <b>E-mail:</b> pererva@bmstu.ru</p>	<p><b>O.V. PERERVA</b> Doctor of Economics, Professor, Head of Department of Production Organization and Management, Kaluga Branch, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Kaluga <b>E-mail:</b> pererva@bmstu.ru</p>
<p><b>Н.А. ГОЛУБЕВ</b> студент Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), г. Москва <b>E-mail:</b> ngolubev5@bk.ru</p>	<p><b>N.A. GOLUBEV</b> Student, Bauman Moscow State Technical University Bauman Moscow State University (National Research University), Moscow <b>E-mail:</b> ngolubev5@bk.ru</p>
<p><b>И.А. ЛОСКУТОВ</b> кандидат технических наук, доцент кафедры индустриального программирования МИРЭА – Российского технологического университета, г. Москва <b>E-mail:</b> faxvex@ya.ru</p>	<p><b>I.A. LOSKUTOV</b> Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University, Moscow <b>E-mail:</b> faxvex@ya.ru</p>

---

**Д.А. СКВОРЦОВА**

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной логистики Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), г. Москва  
**E-mail:** skvortsova\_da@bmstu.ru

**D.A. SKVORTSOVA**

Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial Logistics, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow  
**E-mail:** skvortsova\_da@bmstu.ru

**М.В. БАТЮКОВ**

кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и гуманитарно-социальных дисциплин Липецкого института кооперации (филиала) Белгородского университета кооперации, экономики и права, г. Липецк  
**E-mail:** dwm25@yandex.ru

**M.V. BATYUKOV**

Candidate of Science (Economics), Associate Professor, Department of Economics and Humanities and Social Disciplines, Lipetsk Institute of Cooperation (branch) of the Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, Lipetsk  
**E-mail:** dwm25@yandex.ru

**В.А. ГРЕЧУШКИН**

кандидат педагогических наук, доцент кафедры экономики и гуманитарно-социальных дисциплин Липецкого института кооперации (филиала) Белгородского университета кооперации, экономики и права, г. Липецк  
**E-mail:** grech@mail.ru

**V.A. GRECHUSHKIN**

Candidate of Science (Pedagogy), Associate Professor, Department of Economics and Humanitarian-Social Disciplines, Lipetsk Institute of Cooperation (branch) of the Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, Lipetsk  
**E-mail:** grech@mail.ru

**В.М. КРАВЧЕНКО**

кандидат философских наук, доцент кафедры экономики и гуманитарно-социальных дисциплин Липецкого института кооперации (филиала) Белгородского университета кооперации, экономики и права, г. Липецк  
**E-mail:** kravchenko-VM@mail.ru

**V.M. KRAVCHENKO**

Candidate of Science (Philosophy), Associate Professor, Department of Economics and Humanitarian-Social Disciplines, Lipetsk Institute of Cooperation (branch) of the Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, Lipetsk  
**E-mail:** kravchenko-VM@mail.ru

**Г.И. ПОЛЕННИКОВА**

старший преподаватель кафедры экономики и гуманитарно-социальных дисциплин Липецкого института кооперации (филиала) Белгородского университета кооперации, экономики и права, г. Липецк  
**E-mail:** galpol80@list.ru

**G.I. POLENNIKOVA**

Senior Lecturer, Department of Economics and Humanities and Social Disciplines, Lipetsk Institute of Cooperation (branch) of Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, Lipetsk  
**E-mail:** galpol80@list.ru

**Б.М. ЖИГЖИТОВА**

кандидат экономических наук, доцент Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, г. Улан-Удэ  
**E-mail:** Bayarma\_zhigzhitova@mail.ru

**B.M. ZHIGZHITOVA**

Candidate of Science (Economics), Associate Professor, East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude  
**E-mail:** Bayarma\_zhigzhitova@mail.ru

**А.О. АЮШЕЕВА**

кандидат технических наук, доцент Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, г. Улан-Удэ  
**E-mail:** Bayarma\_zhigzhitova@mail.ru

**A.O. AIUSHEEVA**

Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude  
**E-mail:** Bayarma\_zhigzhitova@mail.ru

<p><b>А.И. ГРИГОРЬЕВА</b> кандидат технических наук, доцент Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, г. Улан-Удэ <b>E-mail:</b> Bayarma_zhigzhitova@mail.ru</p>	<p><b>A.I. GRIGORIEVA</b> Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude <b>E-mail:</b> Bayarma_zhigzhitova@mail.ru</p>
<p><b>А.Н. КУЗЯШЕВ</b> кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и финансов Московского международного университета, г. Москва <b>E-mail:</b> azatkuz6565@mail.ru</p>	<p><b>A.N. KUZYASHEV</b> Candidate of Science (Economics), Associate Professor, Department of Economics and Finance, Moscow International University, Moscow <b>E-mail:</b> azatkuz6565@mail.ru</p>
<p><b>Ю.Я. РАХМАТУЛЛИН</b> кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и финансов Московского международного университета, г. Москва <b>E-mail:</b> ulaj-@mail.ru</p>	<p><b>YU.YA. RAKHMATULLIN</b> Candidate of Science (Economics), Associate Professor, Department of Economics and Finance, Moscow International University, Moscow <b>E-mail:</b> ulaj-@mail.ru</p>
<p><b>Э.А. ГУМЕРОВ</b> кандидат технических наук, доцент кафедры информационного менеджмента и информационно-коммуникационных Московского финансово-промышленного университета «Синергия», г. Москва <b>E-mail:</b> gumerovemil@yandex.ru</p>	<p><b>E.A. GUMEROV</b> Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Information Management and Information and Communications, Moscow Financial and Industrial University "Synergy", Moscow <b>E-mail:</b> gumerovemil@yandex.ru</p>
<p><b>Е.И. МЕНЬШИКОВ</b> кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента Московского международного университета, г. Москва <b>E-mail:</b> e.menshikov@mmu.ru</p>	<p><b>E.I. MENSHIKOV</b> Candidate of Science (Economics), Associate Professor, Department of Management, Moscow International University, Moscow E-mail: e.menshikov@mmu.ru</p>
<p><b>Е.И. УТКИНА</b> кандидат химических наук, доцент кафедры менеджмента и предпринимательства, декан факультета управления Университета управления «ТИСБИ», г. Казань <b>E-mail:</b> utochkamicra@mail.ru</p>	<p><b>E.I. UTKINA</b> Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Management and Entrepreneurship, Dean of the Faculty of Management, TISBI University of Management, Kazan E-mail: utochkamicra@mail.ru</p>
<p><b>А.А. БАТУЕВА</b> магистрант Университета управления «ТИСБИ», г. Казань <b>E-mail:</b> nastenka.batueva@inbox.ru</p>	<p><b>A.A. BATUEVA</b> Master's Student, TISBI University of Management, Kazan <b>E-mail:</b> nastenka.batueva@inbox.ru</p>

---

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

---

---

**НАУКА И БИЗНЕС: ПУТИ РАЗВИТИЯ**  
**SCIENCE AND BUSINESS: DEVELOPMENT WAYS**  
**№ 1(175) 2026**  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

---

Подписано в печать 23.01.2026 г.  
Формат журнала 60×84/8  
Усл. печ. л. 17,74. Уч.-изд. л. 11,25.  
Тираж 1000 экз.