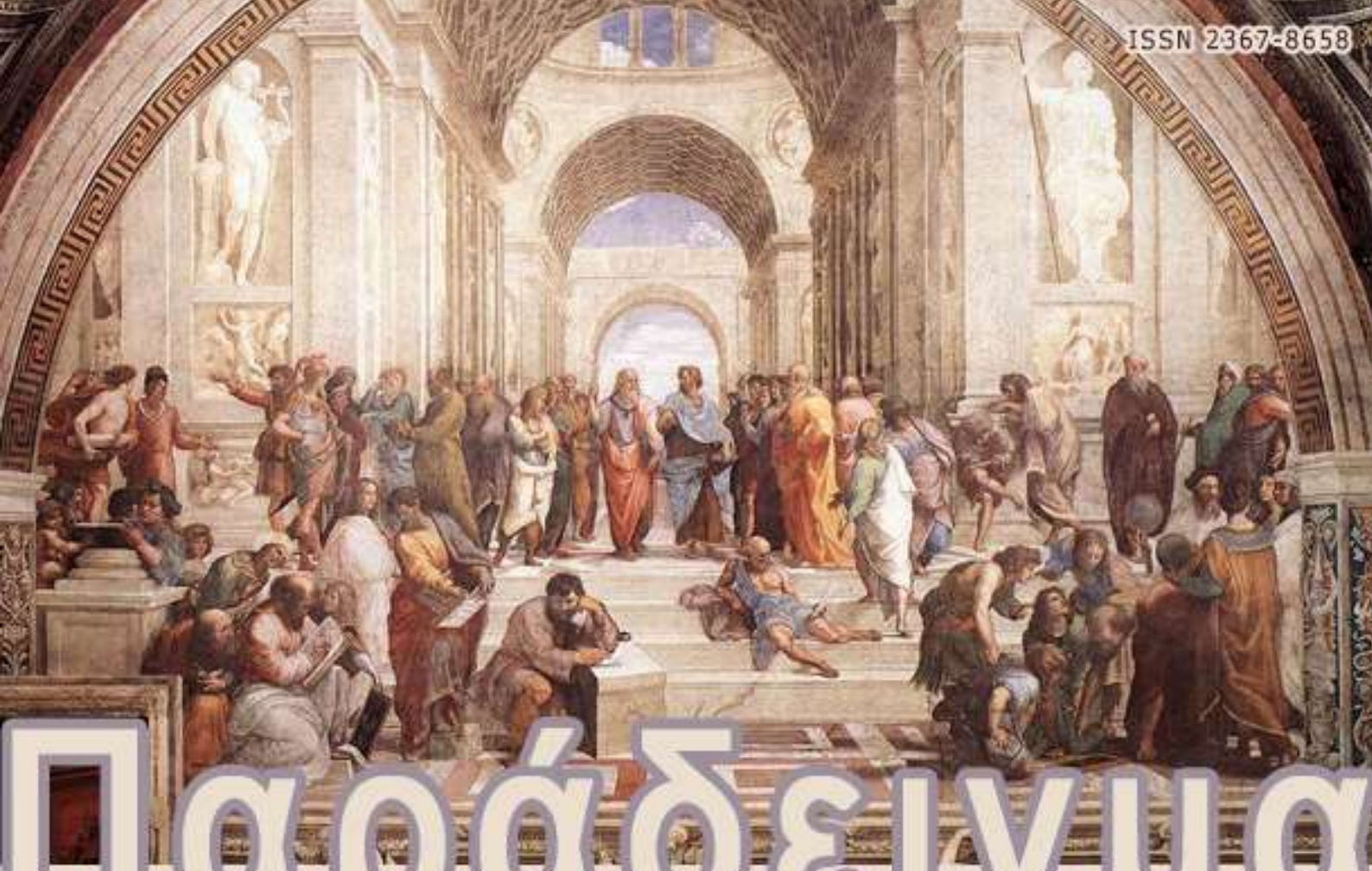
ISSN 2367-8658



Παράδειγμα

Парадигма

Paradigma

№6, 2026
Часть 3

Електронно
научно
списание

Парадигма
Електронно
научно списание

БРОЙ 6/2026
Часть 3

Издател:
"ЦЕНТЪР ЗА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И ИНФОРМАЦИЯ "ПАРАДИГМА"" ЕООД
БЪЛГАРИЯ, гр. Варна 9002,
р-н Одесос, ул. Опълченска No 27
E-mail:
niiparadigma@gmail.com

www.paradigma.science

ISSN 2367-8658

Договоры на размещение:

Публикационная политика:

Редакционен съвет

Абакаров Д. К., к.с.н. (г. Брянск, Россия); **Анжиганова Л. В.,** д.ф.н., профессор (г. Абакан, Россия); **Антамошкин А. Н.**, д.т.н., профессор (г. Красноярск, Россия); **Арпентьева М. Р.,** д. психол. наук, доцент, член-корреспондент РАЕ академик МАЕ (г. Калуга, Россия); **Багоцкий С. В.**, к.б.н., доцент МИОО, ученый секретарь Московского общества испытателей природы (г. Москва, Россия); **Белобрыкина О. А.**, к.психол.н., доцент, академик Академии полярной медицины и экстремальной экологии человека (г. Новосибирск, Россия); **Бобкова Е. Ю.,** к.пед.н., доцент (г. Самара, Россия); **Валитова И. Е.**, к.пс.н., (г. Брест, Республика Беларусь); **Галкина А. И.,** с.н.с., начальник отдела ФГБНУ "ИУО РАО", руководитель Объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование», почетный работник науки и техники РФ (г. Москва, Россия); **Галчева К. Б.**, доцент, доктор по педагогика Пловдивски университет „П.Хилендарски" (г. Пловдив, Република Болгария); **Заславский А. А.,** к. пед. наук, доцент, (г. Москва, Россия); **Заславская О. Ю.,** д.пед.н., профессор; **Землянухина Н. С.,** д.э.н., профессор (г. Саратов, Россия); **Землянухина С. Г.**, д.э.н., профессор (г. Саратов, Россия); **Ищанова Г. Т**., к.э.н., (г. Алматы, Казахстан); **Капрусова М. Н.**, к.ф.н., доцент (г. Борисоглебск, Россия); **Костригин А. А** (г. Нижний Новгород, Россия); **Кошенова М. И.**, к.пс.н., доцент, зав.каф. социальной психологии и виктимологии (г. Новосибирск, Россия); **Кравец О. Я.,** д.т.н., профессор (г. Воронеж, Россия); **Магсумов Т. А.**, к.и.н., доцент (г. Набережные Челны, Россия); **Няголова М. Д.**, канд. психол. наук, доцент истории психологии Великотърновского университета имени Святых Кирилла и Мефодия (г. Велико Търново, Република Болгария); **Останков А. В.,** д.т.н., профессор (г. Воронеж, Россия); **Перова М. Б.**, д.э.н., профессор (г. Вологда, Россия); **Поляков Ю. А.**, к.т.н., доцент, (г. Москва, Россия); **Садчиков А. П.,** д.б.н., профессор Международного биотехнологического центра МГУ имени М.В.Ломоносова, вице-президент Московского общества испытателей природы (г. Москва, Россия); **Саенко Л. В.**, к.ю.н., доцент (г. Саратов, Россия); **Седов В. А.**, к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники (г. Владивосток, Россия); **Седова Н. А.**, к.т.н., доцент (г. Владивосток, Россия); **Семенютина А. В.,** д.с.-х.н., зав. отделом биологии древесных растений ВНИАЛМИ (г. Волгоград, Россия); **Сидоровнин Г. П.,** директор Европейского Столыпинского инфоцентра (г. Майнц, Германия); **Соловьева А. Г.,** к.б.н., профессор РАЕ, с.н.с. (г. Нижний Новгород, Россия); **Суркова И. Ю.,** д. социол. н., доцент (г. Саратов, Россия); **Трендафилова А. Т.**, ассистент Факултета общественного здоровья Медицинский университет-София (г. София, република Болгария); **Фурсов А. Л.,** к.э.н., директор научно-исследовательского института «Парадигма» (г. Саратов, Россия); **Хусяинов Т. М** (г. Нижний Новгород, Россия)

Главен редактор
Андрей Фурсов

ТЕХНОЛОГИИ

УДК 536.2

Жагрин В. А., Орлов Д. С.
Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ ВЫБОРЕ МАТЕРИАЛА ДЛЯ ПОСТРОЙКИ

Аннотация. В статье изучено влияние коэффициента теплопроводности при выборе материала для постройки. Приведены примеры разных материалов изоляции, используемой для постройки зданий, и влияние их коэффициентов теплопроводности на значение теплового потока. Рассчитывается значение теплового потока для разных параметров среды. Сравниваются тепловые потоки при разных параметрах, результаты указываются на рисунке значений плотности теплового потока для выбранных материалов исследования. Рассчитывается экономическая выгода при использовании изоляции.

Ключевые слова: теплопроводность, температура, изоляция, коэффициент теплопроводности, термическое сопротивление, тепловой поток, коэффициент теплоотдачи, экономическая выгода.

Процесс теплопроводности является переносом теплоты, который происходит за счет движения элементов физической системы: молекулы, ионы, электроны. Способность тела передавать через свой объем тепловую энергию с помощью теплопроводности, характеризуется коэффициентом теплопроводности (обозначается как λ), который является физическим параметром вещества [1, с.7]. Коэффициент теплопроводности является числовой характеристикой, которая обозначает эффективность материала проводить тепло. Обычно, коэффициент теплопроводности определяют экспериментальным образом [2, с. 702].

Конвективный теплообмен относится к процессам, происходящим в жидкой и газообразной средах, который представляет собой перенос теплоты за счет переноса массы жидкости или газа [3, с. 534].

Если жидкость неподвижна, а у поверхности контакта жидкости и твердого тела стабилизируются нормальные к ним градиенты (изменения) температуры, то перенос тепловой энергии в таком случае сводится к решению стандартных задач теплопроводности. Однако, если среда начинает движение, то перенос теплоты в этом случае происходит не только под действием градиентов температуры, но и за счет движения среды. Данную совокупность процессов принято называть конвекцией [4, с.7].

Рассмотрим поверхность условного здания в Сургуте. Допустим, здание построено из пустотелого керамического кирпича. Для производства расчетов,

возьмем коэффициент теплопроводности условно-эффективных групп изделий по теплотехническим характеристика по ГОСТ 530-2012. λ = 0,4 Вт/(м·°С).

На всех современных постройках, помимо материала постройки здания, используется также теплоизоляция, которая служит для предотвращения и уменьшения влияния окружающей среды на помещение внутри сооружения. Качественно выбранная теплоизоляция позволяет сократить теплопотери, снизить расходы на отопление и кондиционирование, защитить здание от перепадов температуры и продлить срок службы здания.

Приведем примеры теплоизоляций, их коэффициенты теплопроводности, и используемых при постройке зданий в таблице.

Таблица 1 – Материалы и их коэффициенты теплопроводности.

Материал	**Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·°С)**
Пенополиуретан	0,023
Пенополистирол	0,038
Экструдированный пенополистирол	0,031
Материал	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·°С)
Минеральный вата	0,048
Пенопласт ПВХ	0,052
Базальтовая вата	0,039
Эковата	0,032
Изолон	0,031
Пенофол	0,037

В рассматриваемом вопросе в данной статье будет рассматриваться конвективная теплоотдача, которая характеризуется коэффициентом теплоотдачи α (Вт/(м^2·К)). Коэффициент конвективной теплоотдачи характеризует тепловую мощность, которую рассеивает путем конвекции в окружающую среду, или воспринимает от нее, единица поверхности твердого тела [5, с. 2].

Для демонстрации методики расчета, возьмем первичные данные из учебного пособия «Тепломассообмен. Практикум.» ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства».

Пусть: α_1=8,7 Вт/(м^2·К), α_2=23 Вт/(м^2·К), t_1 (температура воздуха внутри помещения) =18°С, t_2 (температура воздуха снаружи помещения) = -25°С.

Плотность теплового потока q (Вт/м^2) – это физическая величина, которая определяет интенсивность теплообмена [6, с. 1], и равна количеству тепловой энергии, проходящему в единицу времени через единицу площади. Определяется по формуле:

$$q = k \cdot (t_1 - t_2)$$

k – коэффициент теплопередачи Вт/(м^2·К), характеризует тепловой поток проходящий через единицу площади поверхности стенки при разности температур. [7, с. 238] Для однослойной стенки вычисляется по формуле:

$$k = \frac{1}{R_{\alpha 1} + R_{s1} + R_{s2} + R_{\alpha 2}}$$

R – термическое сопротивление (м^2·К/Вт), это способность тела, т.е. его поверхности или какого-нибудь слоя препятствовать распространению теплового движению молекул. Оно показывает, какая разница температур требуется для передачи единицы теплового потока через материал или объект. Т.е., чем выше термическое сопротивление, тем сложнее теплу пройти через материал, что делает его лучшим изолятором [8, с. 3].

$$R_{\alpha 1} = \frac{1}{\alpha_1}$$

$$R_{\alpha 2} = \frac{1}{\alpha_2}$$

$$R_{s1} = \frac{\delta_1}{\lambda_1}$$

$$R_{s2} = \frac{\delta_2}{\lambda_2}$$

Для данной задачи возьмем толщину теплоизоляции (δ_1) и стенки (δ_2), который положен в два кирпича, равной 0,25 и 0,51м соответствующе.

Далее будут представлены расчеты плотности теплового потока для видов теплоизоляции, указанных в таблице 1. Формулы расчетов укажем для первого материала изоляции пенополиуретана, далее, итоги подсчетов будут указаны в таблице 2.

$$R_{\alpha 1} = \frac{1}{8{,}7} = 0{,}115 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$$

$$R_{\alpha 2} = \frac{1}{23} = 0{,}043 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$$

$$R_{s1} = \frac{0{,}51}{0{,}4} = 1{,}275 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$$

$$R_{s2} = \frac{0{,}25}{0{,}023} = 10{,}870 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$$

Таблица 2 – Числовые значения термических сопротивлений.

Материал изоляции	$R_{\alpha 1}$, м²·К/Вт	$R_{\alpha 2}$, м²·К/Вт	R_{s1}, м²·К/Вт	R_{s2}, м²·К/Вт
Пенополиуретан	0,115	0,043	1,275	10,870
Пенополистирол	0,115	0,043	1,275	6,579
Экструдированный пенополистирол	0,115	0,043	1,275	8,065
Минеральный вата	0,115	0,043	1,275	5,208
Пенопласт ПВХ	0,115	0,043	1,275	4,808
Базальтовая вата	0,115	0,043	1,275	6,410
Эковата	0,115	0,043	1,275	7,813
Изолон	0,115	0,043	1,275	8,065
Пенофол	0,115	0,043	1,275	6,757
Без изоляции	0,115	0,043	1,275	0

$$k_1 = \frac{1}{0{,}115 + 1{,}275 + 10{,}870 + 0{,}043} = 0{,}081 \text{Вт}/(\text{м}2 \cdot \text{К})$$

$$q_1 = 0{,}081 \cdot \big(18 - (-25)\big) = 3{,}5 \text{ Вт/м}^2$$

Представим полученные значения в виде таблицы:

Таблица 3 – Значения теплового потока для выбранных теплоизоляционных материалов

Материал изоляции	**Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·°С)**	**Коэффициент теплопередачи k, Вт/(м²·К)**	**Плотность теплового потока q, (Вт/м²)**
Пенополиуретан (λ1)	0,023	0,081	3,50
Пенополистирол (λ2)	0,038	0,125	5,37
Экструдированный пенополистирол (λ3)	0,031	0,105	4,53
Минеральный вата (λ4)	0,048	0,151	6,47
Пенопласт ПВХ (λ5)	0,052	0,160	6,89
Базальтовая вата (λ6)	0,039	0,127	5,48
Эковата (λ7)	0,032	0,108	4,65
Изолон (λ8)	0,031	0,105	4,53
Пенофол (λ9)	0,037	0,122	5,25
Без изоляции	0,4	0,697	30

Для наглядности, покажем на рисунке значения плотности теплового потока для исследуемых материалов:

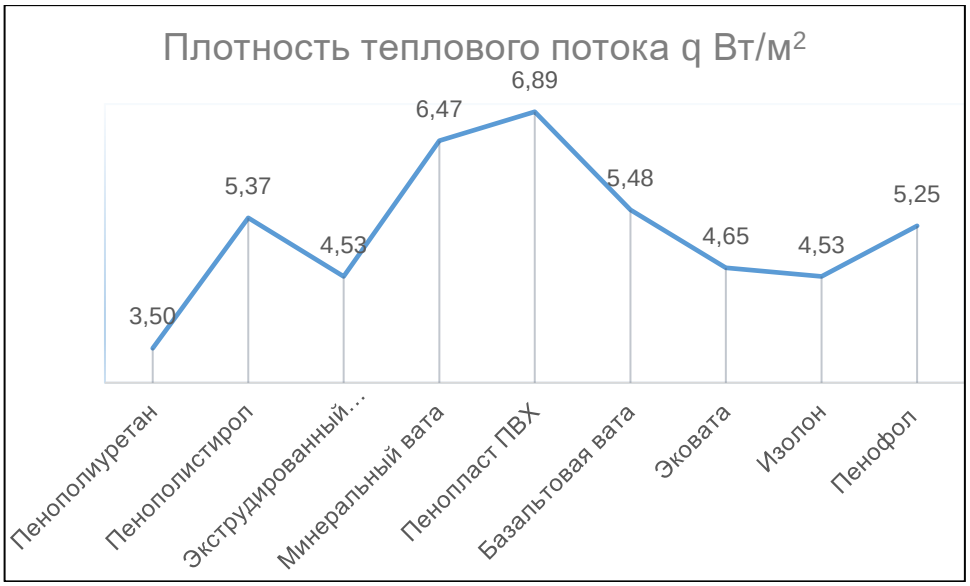


Рисунок 1 – Значения плотности теплового потока q для исследуемых материалов

Для расчета экономической части исследуемой задачи, посчитаем стоимость установки изоляции на здание из кирпича.

Посчитаем, какое количество теплоты Q потребуется для обогрева здания с размерами a=15м, b=15м, c=3м, для учитывая разные плотности теплового потока q., и полученные значения переведем в Гкал/час (1 Гкал/ч = 1163000 Вт)

$Q = \left(a \cdot q \cdot V \cdot (t_1 - t_2)\right)/1163000$, *где*

a – поправочный коэффициент с учетом теплопотерь = 1,05;

V – объем здания = 180 м^3;

Q_1=0,097 Гкал/ч; Q_2=0,14 Гкал/ч; Q_3=0,118 Гкал/ч; Q_4=0,169 Гкал/ч; Q_5=0,18 Гкал/ч; Q_6=0,143 Гкал/ч; Q_7=0,121 Гкал/ч; Q_8=0,118 Гкал/ч; Q_9=0,137 Гкал/ч.

Рассчитаем Q_0, количество теплоты, требуемое для обогрева здания без изоляции:

Q_0=0,786 Гкал/ч.

Стоимость отопления без установки изоляции составит 1780 руб.

Выгоду, посчитаем как разницу стоимости отопления без установки изоляции, и с изоляцией.

Стоимость 1 Гкал/ч на 2026 год, составляет 2265,07 рублей. Внесем данные в таблицу:

Таблица 4. Экономическая выгода при установке изоляции

Материал изоляции	Стоимость установки изоляции, руб.	Стоимость отопления, руб.	Выгода, руб.	Сроки окупаемости, лет
Пенополиуретан	330000	221,9204	1558,7	26,5
Пенополистирол	97500	318,5353	1462,085	8,3
Экструдированный пенополистирол	123600	268,7133	1511,907	10,2
Минеральный вата	109200	384,2693	1396,351	9,8
Пенопласт ПВХ	49200	408,937	1371,683	4,5
Базальтовая вата	111600	325,3859	1455,234	9,6
Эковата	50400	276,0376	1504,582	4,2
Изолон	352000	268,7133	1511,907	29,1
Пенофол	284800	311,6199	1469	24,2

Сроки окупаемости указаны с учетом длительности отопительного периода (8 месяцев).

В заключение проведенной работы можно сделать вывод что выявлена прямая зависимость плотности теплового потока от коэффициента теплопроводности материала. Среди рассмотренных материалов особо выделяется пенополиуретан — он показывает отличные показатели теплоизоляции. Однако, срок окупаемости у пенополиуретана весьма большой. Из соотношения срок окупаемости/теплоизоляционные свойства можно выделить экструдированный пенополистирол

Список литературы:

1. Овчинников С. В. Введение в теорию теплообмена: теплопроводность в твёрдых телах : учеб.-метод. пособие для студентов физического факультета направлений подготовки 03.03.02 «Физика» (бакалавриат) и 03.04.02 «Физика» (магистратура) [Электронное издание]. – Саратов : СГУ имени Н. Г. Чернышевского, 2015. – URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1486.pdf (дата обращения: 11.06.2026).

2. Малюков С.В. Определение коэффициента теплоотдачи / Малюков С.В. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований – 2016. – №3-4. – С. 702-702а. EDN: VQYDUF

3. Овчинников С. В. Конвективный теплообмен. Методики инженерного расчёта коэффициента конвективной теплоотдачи / С. В. Овчинников // Учебно-методическое пособие. – 2015. – С. 7. – URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1483.pdf (дата обращения: 11.06.2026).

4. Сергеева А.В. Определение коэффициентов теплоотдачи с поверхности теплопровода / Сергеева А.В. // Вестник науки, 2021. – Т. 1. – № 8(41) – С.138-142. EDN: SXSCTW

5. Пириева, Г. С. Анализ конвективного теплообмена и его виды // Вестник науки. – 2024. – Т. 3, № 2 (71). – С. 543–549. EDN: OPREFL

6. Заварзин, В. И. Подготовка специалистов-оптиков на факультете «Оптико-электронное приборостроение» МГТУ им. Н. Э. Баумана // Инженерный журнал: наука и

инновации. – 2013. – № 7 (19). – С. 1. EDN: RNCQWT

7. Малькова, А. Е. Зависимость коэффициента теплопередачи от скорости взаимодействующих фаз // Вестник науки. – 2022. – Т. 3. – № 11 (56). – С. 235–239. EDN: SLWFGT

8. Пославский, А. П. Метод определения термического сопротивления элементов силовых агрегатов с поверхностями теплообмена // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – № 4 (179). – С. 95–101. EDN: UHINKB

УДК 620.16

Жагрин В. А., Орлов Д. С.
Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ПОДГОТОВКИ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ К РАБОТЕ В РАМКАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЯ

Аннотация. В статье изучается подготовка теплообменных аппаратов к работе в рамках технического освидетельствования. Предлагается к вниманию промывка трубопроводов лимонной кислотой с определенной концентрацией. Поднимается проблема выпадения нерастворимого цитрата железа и способы разрешения данной проблемы. Указывается порядок действий для промывки трубопроводов и подготовки их к эксплуатации. Описываются возможные дефекты, возникшие в процессе проведения технического освидетельствования, и порядок действий для их нейтрализации.

Ключевые слова: теплообменник, техническое освидетельствование, лимонная кислота, охрана труда, гидравлический удар.

Теплообменник (теплообменный аппарат) – устройство, которое предназначено для передачи тепла от одного теплоносителя к другому без прямого смешивания [1, с. 89].

Теплообменные аппараты, работающие под избыточным давлением, должны подвергаться техническому освидетельствованию в соответствии с требованиями Приказа Минэнерго России от 14.05.2025 N 511 «Об утверждении Правил технической эксплуатации объектов теплоснабжения и теплопотребляющих установок».

Периодичность, объем, методы технических освидетельствований сосудов, работающих под избыточным давлением не реже 1 раза в год.

Оборудование объектов теплоснабжения, работающее под избыточным давлением, в период эксплуатации должно подвергаться техническим освидетельствованиям, которые включают комплекс работ по определению фактического состояния оборудования, его работоспособности.

Техническое освидетельствование оборудования, работающего под избыточным давлением, должно состоять из наружного и внутреннего осмотров, гидравлического испытания на прочность и плотность этого оборудования [2, с. 2].

При подготовке к отопительному периоду теплообменные аппараты подлежат промывке, а при увеличении гидравлического сопротивления более установленного значения подвергаются очистке трубного и межтрубного пространства. Межтрубное пространство очистки подлежит не реже 1 раза в 3 года. Трубное пространство необходимо очищать не реже 1 раза в год.

Согласно Приказа Минэнерго России от 14.05.2025 N 511 «Об утверждении Правил технической эксплуатации объектов теплоснабжения и теплопотребляющих установок» п. 412 при подготовке к отопительному периоду теплообменные аппараты подлежат промывке.

Химическая промывка теплообменного оборудования проводится с целью удаления отложений, образовавшихся на внутренних поверхностях теплообменного оборудования во время его работы [3, с. 257].

Очистка трубной и межтрубной системы теплообменных аппаратов выполняется периодически, по мере загрязнения, но не реже одного раза в год перед отопительным периодом. Очистка межтрубной системы теплообменных аппаратов допускается производить не реже 1 раза в 3 года.

Перед началом работ необходимо провести анализ работы промываемого оборудования. Для трубчатых теплообменников необходимо произвести проверку плотности трубной системы.

Химическая очистка производится по программе, утверждаемой техническим главным инженером теплоснабжающей организации.

Схема сборки оборудования для проведения промывки химическим раствором выглядит следующим образом (рисунок 1):

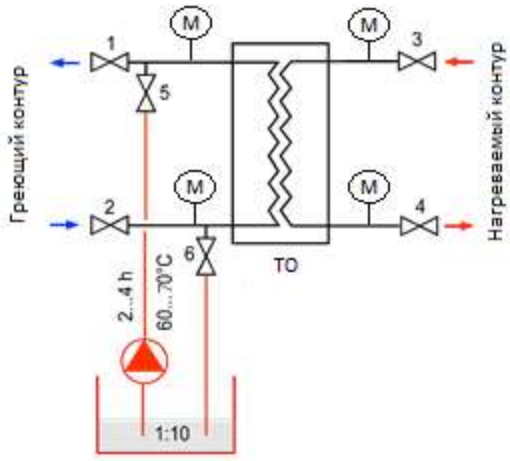


Рисунок 1 – Схема установки для промывки теплообменника

Порядок проведения работ.

Технологическая циркуляционная схема должна отвечать следующим критериям:

1) вход моющего раствора осуществляется как можно ближе к оборудованию в наиболее нижней точке, ближайшее фланцевое соединение заглушить;

2) выход моющего раствора осуществляется в наиболее верхней точке, ближайшее фланцевое соединение заглушить.

3) теплообменник отделяют от остальной системы – закрывают запорную арматуру № 1 и 2;

4) оборудование для промывки подсоединяют к теплообменнику и открывают запорную арматуру № 5 и 6. Промывочное оборудование включают и добавляют воду до возникновения циркуляции. Желательно использовать 1/10 от максимального расчетного расхода теплообменника;

5) в емкость промывочной установки добавляют химикат до образования промывочного раствора нужной концентрации. Это нужно делать умеренными порциями, чтобы предотвратить кратковременную повышенную концентрацию химиката в растворе;

6) промывочному раствору дают циркулировать в течение необходимого времени – в общем случае 2-4 часа. При необходимости разогревают раствор и добавляют концентрат. Желательно поддерживать температуру раствора при промывке в пределах 60°С - 70°С. Для подогрева раствора можно использовать теплоноситель нагреваемой стороны;

7) по окончании промывки из теплообменника сливают промывочный раствор и промывают чистой водой, либо щелочным раствором. При промывке следует использовать большие скорости потока для выноса отложений, отторгнутых от поверхности теплообменника. Затем запорная арматура № 5 и 6 закрывается;

8) открытием запорной арматуры № 1 и 2 теплообменники снова включаются в работу.

Концентрация лимонной кислоты выбирается в зависимости от загрязненности поверхности и может колебаться от 2,5 до 5,0%. При более высокой концентрации возникает опасность выпадения малорастворимого цитрата железа. Очистку ведут при 60-70°С, недопустимо повышения температуры выше 115°С, усиливается коррозия. Скорость циркуляции моющего раствора должна быть не менее 0,5 м/сек, но не более 1,8 м/сек во избежание чрезмерного усиления коррозии латуни [4, с. 46].

Во избежание выпадения нерастворимого цитрата железа общее время кислотной стадии не должно превышать 4 часа. Содержание железа в растворе не следует допускать более 0,5%, pH среды не должно быть выше 4,5. Перерывы в циркуляции недопустимы. В случае необходимости часть отработанного раствора сливают и в систему добавляют свежий раствор лимонной кислоты, добавление лимонной кислоты в моющий раствор без предварительного растворения до рабочих концентраций недопустимо. При проведении очистки должен быть организован химический контроль, в обязательном порядке включающий в себя определение pH и концентрации железа в моющем растворе, периодичность контроля каждые 30 минут.

При появлении признаков выпадения цитрата железа, т.е. при снижении концентрации железа в растворе и повышении pH раствора выше 4,5, следует

вытеснить моющий раствор горячей водой и организовать ее циркуляцию для растворения выпавших цитратов.

Отработанный моющий раствор вытесняется горячей водой.

Технология химической очистки раствором лимонной кислоты состоит из следующих операций:

а) обработка раствора лимонной кислоты с концентрацией 2,5- 5,0% при температуре 60-70 °С в течение 2-4 ч;

б) вытеснение отработанного раствора горячей водой до полного осветления и достижения pH 7.

Химический контроль выполняется не реже 1 раза в час в следующем объёме:

1) pH моющего раствора при его приготовлении и циркуляции;

2) pH отработанного моющего раствора;

3) pH водных промывок по мере необходимости.

Визуальный контроль работ.

Визуальный контроль выполняется не реже 1 раза в час в следующем объёме:

1) моющего раствора при его приготовлении и циркуляции;

2) оценки окраски и консистенции раствора;

3) оценки вымываемого осадка;

4) проведения водных промывок по мере необходимости;

5) отбора образцов проб.

Внимание следует уделять качеству монтажа временных трубопроводов, включенных в контур циркуляции, чтобы исключить образование течей, приводящих к потере части промывочного раствора, что осложняет сбор промывочного раствора для его нейтрализации и обезвреживания, а также защиту оборудования, особенно электротехнического, от его воздействия.

Все промывочные отработанные растворы с pH ниже 5 нейтрализуются щелочью до pH 7 и так как раствор не имеет биологически опасных веществ и ПДК вредных веществ в норме, то отработанный раствор сбрасывается в отдельную ёмкость для дальнейшей утилизации.

По завершению химической очистки теплообменного аппарата провести гидравлические испытания на прочность и плотность.

Гидравлические испытания на прочность и плотность теплообменных аппаратов, установленных в тепловых пунктах, должны проводиться ежегодно в межотопительный период [5, с. 12].

Испытания проводятся с соблюдением следующих основных требований:

1) температурой воды не ниже +5°С и не выше +40оС;

2) при заполнении водой из трубопроводов должен быть полностью удален воздух;

3) испытательное давление должно быть выдержано не менее 10 минут и затем снижено до рабочего;

4) используются два аттестованных пружинных манометра класса не ниже 1,5 с диаметром корпуса не менее 160 мм.

Подготовительные работы к испытаниям:

5) ознакомиться с инструкцией по эксплуатации электрического насоса для опрессовки трубопроводных систем Rothenberger RP PRO-3 или аналогом;

6) убедиться в том, что запорной арматурой запорную арматуру № 1,2,3,4 (рис. 2) теплообменного аппарата находится в положении «закрыта» и не пропускает сетевую и холодную воду;

7) произвести осмотр наружный и внутренний осмотр теплообменника, убедиться в удовлетворительном состоянии;

8) при гидравлических испытаниях на прочность и плотность секционных скоростных водоподогревателей проводятся снятие с двух сторон калачей;

9) произвести подключения установки для повышения давления со стороны межтрубного пространства и ХВС (;

10) произвести подключения установки для повышения давления к электропитанию напряжением 220В, 50 Гц;

11) после проведения очистки трубного и межтрубного пространства необходимо заполнить межтрубное пространство холодной водой с температурой воды не ниже +5℃ и не выше +40°С;

12) убедиться в работоспособности КИП;

13) для пластинчатых теплообменников. Перед проведением гидравлических испытаний необходимо убедиться в надежности крепления стяжных шпилек теплообменника от возможного раскручивания при транспортировке. Шпильки не должны проворачиваться «от руки». Также необходимо проверить соответствие расстояния между неподвижной и прижимной плитой значению, указанному в паспорте. Минимально допустимое значение расстояния приведено в паспорте и на табличке теплообменника. В случае ослабления шпилек их необходимо подтянуть, соблюдая размер стяжки.

Порядок проведения работ.

Схема сборки оборудования для проведения гидравлических испытаний на прочность и плотность теплообменного оборудования выглядит следующим образом (рисунок 2):

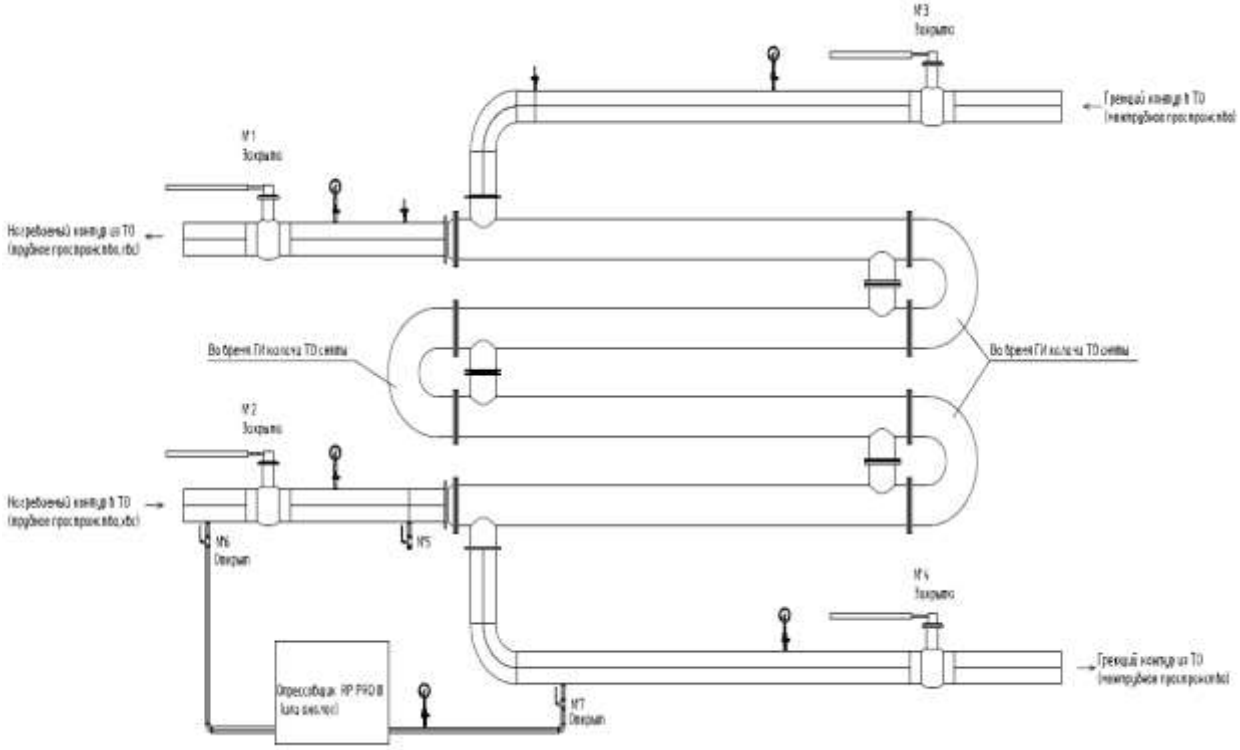


Рисунок 2 – Схема установки для проведения гидравлических испытаний на прочность и плотность теплообменника

1) запорную арматуру № 6,7 (рис. 2) открыть;

2) включить установку для плавного повышения давления в теплообменном аппарате со стороны межтрубного пространства. Скорость подъема давления при гидравлических испытаниях не более 3,0 кгс/см2 в минуту. Поднять давление для гидравлических испытаний на прочность и плотность сосудов минимальное значение пробного давления принимается 1,25 рабочего давления. Максимально допустимое значение пробного давления устанавливается в соответствии с технической документацией организации-изготовителя или расчетами на прочность. Для пластинчатого теплообменника разница давлений между полостями не должна превышать 1,2 Мпа. После того, как достигнуто нужное давление воды, следите, чтобы насос работал не дольше 3 мин;

3) отключение опрессовочной установки;

4) запорную арматуру № 6,7 (рис. 2) закрыть;

5) оставить под давлением не менее 10 минут;

6) снизить давление до рабочего;

7) провести наружный осмотр вальцовки трубок в трубных досках, а также исправность всей установленной арматуры и качество трубопроводов;

8) слить холодную воду из межтрубного пространства.

После проведения гидравлических испытаний на прочность и плотность трубной системы водоподогревателя, осмотреть внутренние поверхности трубной системы эндоскопом.

При выявлении не плотности водоподогреватель должен быть выведен в ремонт.

Трубки, имеющие не плотность необходимо отглушить и провести повторные испытания.

Оборудование считается выдержавшим гидравлическое испытание на прочность и плотность, если не обнаружено:

1) трещин или признаков разрыва;

2) видимых остаточных деформаций;

3) течи, потения в сварных, развальцованных, заклепочных соединениях и в основном металле;

4) течи в разъемных соединениях;

5) падения давления по манометру.

В развальцованных и разъемных соединениях допускается появление отдельных капель, которые при выдержке времени не увеличиваются в размерах.

Пластинчатые теплообменники чувствительны к гидравлическому удару. Гидравлический удар может произойти при регулировании, ремонтах, запуске насосов и т.д. Для того чтобы исключить гидравлический удар, рекомендуется использовать дросселирование пневматических клапанов, устанавливать стабилизаторы давления или разрывные мембраны на циркуляционных трубопроводах, устанавливать реле запаздывания в электрической сети управления, организовывать автоматический запуск насосов только при закрытой арматуре и т.д. [6, с. 44].

По результатам промывки и испытаний на прочность и плотность теплообменного оборудования составляются:

1) акт о гидравлических испытаниях теплообменного оборудования;

2) аварийный акт по результатам дефектовки теплообменного оборудования;

3) акт промывки теплообменного оборудования;

4) составление отчета о проведении температурных и гидравлических испытаний теплообменного оборудования.

Работы выполняются по наряду-допуску.

Персонал, участвующий в промывке:

– проходит инструктаж по ТБ с записью в Журнале инструктажей;

– обеспечивается спецодеждой и индивидуальными средствами защиты;

– ответственность за исполнение техники безопасности выделенным персоналом несет производитель работ по наряду-допуску [7, с. 62].

Лица, не участвующие в промывке, из зоны промываемого оборудования должны быть удалены.

Места производства работ по химической очистке должны быть достаточно освещены. В местах повышенной опасности временные трубопроводы, около бака в момент приготовления раствора, около насоса, вывешиваются знаки безопасности - плакаты: «Осторожно! Опасная зона!», «Осторожно! Кислота!», «Проход запрещен», «Не курить!».

При появлении течей и разгерметизации оборудования работы по промывке прекращаются.

Для нейтрализации разлитого раствора с pH ниже 6, при образовании течи на объекте необходимо иметь раствор кальцинированной соды в необходимом количестве.

Рабочее место должно быть оснащено медицинской аптечкой и нейтрализующими растворами для персонала:

1)2% раствор бикарбоната натрия и 2% раствор борной кислоты для промывки глаз;

2)4% раствор бикарбоната натрия и 4% раствор борной кислоты для обработки кожи.

При промывочных работах персонал должен быть обеспечен дополнительными индивидуальными средствами защиты кожных покровов, глаз, дыхательных путей, а также нижних конечностей [8, с. 151].

Запрещается проведение любых других работ вблизи места проведения химической очистки, не связанных с ней.

Рабочее место около промывочной установки обеспечить:

1) водой;

2) 2-3% раствором питьевой соды.

Действия персонала при возникновении аварийной ситуации или положения, угрожающего жизни людей и целостности оборудования:

1) при возникновении аварии, немедленно сообщить об этом руководителю работ, принять, по возможности, меры по локализации аварии;

2) в случае травмирования немедленно оказать на месте первую медицинскую или экстренно-реанимационную помощь пострадавшему и вызвать скорую помощь;

3) немедленно прекратить работу в случае появления аварийной ситуации, опасности повреждения своего здоровья или здоровья окружающих людей, принять меры по выводу людей из зоны опасности по безопасному маршруту.

Список литературы:

1. Хван, В. С., Пиронко, С. А. Теплообменник // Строительство и техногенная безопасность. – 2016. – № 5 (57). – С. 89–92.

2. Глянько М.А. Обеспечение безопасности при эксплуатации оборудования на

объектах энергетики // Электронный научный журнал «APRIORI. Серия: естественные и технические науки». – 2015. – №5. – С. 2. EDN: UMDJIR

3. Вертинский А.П. Физико-химические методы очистки сточных вод: проблемы, современное состояние и возможные пути усовершенствования / Вертинский А.П. // Инновации и инвестиции. – 2019. – №11. – С. 257-261. EDN: UYXBRJ

4. Еревин В.Е., Комарова В.И. Технологические основы получения лимонной кислоты / Еревин В.Е., Комарова В.И. // Пищевая промышленность. – 2013. – №12. – С. 46-47. EDN: RSONIJ

5. Любимов, А. Н., Кочетов, Д. М. Гидравлические испытания паровых и водогрейных котлов // Вестник науки и образования. – 2016. – № 2 (14). – С. 12–15.

6. Калиниченко, Р. А. Гидроудар в трубопроводе: причины, последствия, способы предотвращения // Форум молодых ученых. – 2018. – № 6-2 (22). – С. 43–47. EDN: YLPYQX

7. Елин, А. М., Соколова, А. С. Особенности обучения работников охране труда в условиях современной экономики / А. М. Елин, А. С. Соколова // Социально-трудовые исследования. – 2024. – № 2 (55). – С. 62–77. EDN: CDHTIB

8. Мешкова, Л. С. Актуальные проблемы применения средств индивидуальной защиты / Л. С. Мешкова; науч. рук. М. А. Собенина // Вестник науки. – 2024. – Т. 5. – № 12-2 (81). – С. 151–157. EDN: LWSDVE

УДК 004.056.5

Долгова Л. В., Титова Е. В.
Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, Россия

МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГРАФИЧЕСКОЙ СРЕДЫ GNOME В ОС АЛЬТ ПОСРЕДСТВОМ МЕХАНИЗМОВ БЛОКИРОВКИ DCONF

Аннотация. В статье рассматриваются методы усиления безопасности графической среды GNOME в операционной системе Альт Linux посредством централизованного управления конфигурацией с использованием механизма Dconf. Исследование охватывает теоретические основы архитектуры Dconf, практические аспекты реализации политик безопасности и анализ ограничений данного подхода. Экспериментальная часть выполнена на платформе ОС Альт Рабочая станция 11.1 с графической средой GNOME Shell 47.4. Определены основные векторы обхода ограничений Dconf посредством сторонних терминальных приложений и виртуальных TTY-консолей Linux, и предложены дополнительные механизмы системной защиты. Результаты работы подтверждают целесообразность комплексного подхода к усилению защиты Linux-рабочих станций, при котором политики Dconf применяются совместно с системными средствами контроля доступа.

Ключевые слова: GNOME, Dconf, hardening, политики безопасности, GSettings, Dconf locks, TTY-консоль.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое распространение операционных систем на базе ядра Linux в корпоративной и образовательной среде обусловило повышенный интерес к вопросам обеспечения их безопасности на уровне рабочих станций. Обязательные требования к защите рабочих мест в государственных информационных системах установлены приказом ФСТЭК России № 17 [8], для систем обработки персональных данных – приказом ФСТЭК России № 21 [9], а конкретные технические меры по защите рабочих станций систематизированы в методическом документе ФСТЭК «Меры защиты информации в государственных информационных системах» [10]. Выполнение перечисленных требований предполагает ограничение прав пользователя, контроль над съёмными носителями и управление программной средой рабочего места.

Графическая среда GNOME, входящая в состав ОС Альт Linux, является основным интерфейсом взаимодействия пользователя с системой. Вместе с тем параметры безопасности GNOME в конфигурации по умолчанию не отвечают требованиям режимных объектов и корпоративных сред: отсутствуют ограничения на запуск терминала, автоматическое монтирование внешних носителей не заблокировано, а пользовательские расширения GNOME Shell не

контролируются. Перечисленные особенности конфигурации расширяют поверхность атаки и создают потенциальные векторы несанкционированного доступа к информационным ресурсам [12].

Одним из штатных инструментов централизованного управления параметрами GNOME является механизм блокировки Dconf, являющийся низкоуровневой системой хранения конфигурации. Dconf обеспечивает возможность принудительного применения политик безопасности (lockdown) на уровне системных администраторов. Применение Dconf в контексте задач информационной безопасности позволяет реализовать комплекс мер по усилению защищённости рабочих станций без использования сторонних средств защиты информации.

Объект исследования: графическая среда GNOME в операционной системе Альт Linux.

Предмет исследования: механизм Dconf как инструмент централизованного управления политиками безопасности GNOME.

Цель работы: исследование методов усиления безопасности графической среды GNOME в ОС Альт Linux посредством механизмов Dconf, реализация не менее пяти политик hardening, анализ их эффективности и выявление ограничений.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1) изучить архитектуру и принципы функционирования Dconf как инструмента управления конфигурацией GNOME;
2) реализовать централизованные политики hardening GNOME с применением механизмов Dconf locks;
3) провести экспериментальную проверку корректности применения и устойчивости реализованных политик;
4) выявить и проанализировать потенциальные векторы обхода ограничений Dconf;
5) обосновать дополнительные системные меры для нейтрализации выявленных векторов обхода.

Методы исследования: лабораторный эксперимент на виртуальной машине с ОС Альт Рабочая станция 11.1, функциональное тестирование реализованных политик, тестирование векторов обхода ограничений, сравнительный анализ Dconf и альтернативных механизмов защиты (SELinux, AppArmor, PAM).

Научная новизна работы состоит в систематическом анализе векторов обхода ограничений Dconf применительно к ОС Альт Linux, включая оценку остаточных рисков для каждого вектора, и в разработке комплексных рекомендаций по нейтрализации выявленных уязвимостей конфигурации.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения результатов исследования при построении защищённых рабочих станций на

базе ОС Альт Linux в государственных и корпоративных информационных системах, в том числе при выполнении мер УПД и ЗСВ, регламентированных приказом ФСТЭК № 17 [8].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УСИЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ GNOME

Концепция hardening рабочих станций базируется на принципе минимальных привилегий: пользователь должен располагать ровно теми возможностями, которые необходимы для выполнения его функций [13]. Применительно к графической среде это означает ограничение доступа к инструментам, способным расширить привилегии или создать неконтролируемые каналы передачи данных, а именно встроенным терминальным эмуляторам, механизмам подключения внешних носителей и расширяемым компонентам интерфейса. Совокупность таких точек воздействия образует поверхность атаки графической среды; её сокращение является одним из уровней защиты в рамках концепции эшелонированной обороны (defence in depth) [12].

Централизованное управление конфигурацией безопасности принципиально отличается от ручной настройки: оно обеспечивает единообразное применение политик ко всем учётным записям системы, исключает их случайное или намеренное изменение пользователем и допускает верификацию состояния конфигурации в любой момент. Именно эти свойства определяют роль механизма Dconf как инструмента реализации политик hardening на уровне графической среды GNOME [2].

Dconf представляет собой низкоуровневую систему хранения настроек, разработанную специально для графической среды GNOME. В отличие от высокоуровневого API GSettings, с которым непосредственно взаимодействуют приложения, Dconf обеспечивает управление бинарными базами данных конфигурации и определяет порядок их загрузки [2, 3]. Архитектурно Dconf состоит из фонового сервиса (dconf-service), клиентской библиотеки и бинарных баз данных параметров, взаимодействие между которыми осуществляется через механизм межпроцессного взаимодействия D-Bus [2].

Ключевым элементом механизма Dconf с точки зрения администрирования безопасности является система профилей. Профиль Dconf, располагающийся по пути /etc/dconf/profile/user, определяет иерархию баз данных параметров, последовательно загружаемых системой. Типовой профиль включает пользовательскую базу (user-db:user) и одну или несколько системных баз (system-db:local, system-db:policy, system-db:distr), загружаемых в порядке убывания приоритета [2].

Системные базы данных хранятся в скомпилированном бинарном виде в каталоге /etc/dconf/db/. Их источником служат текстовые INI-подобные файлы в подкаталогах вида /etc/dconf/db/<имя_базы>.d/. Компиляция исходных файлов в

бинарную базу выполняется командой dconf update и необходима для того, чтобы внесённые изменения вступили в силу [2].

Механизм блокировки параметров (Dconf locks) предназначен для принудительного применения политик безопасности. Он запрещает пользователю изменять определённые параметры через любой стандартный инструмент управления настройками GNOME, например, командный интерфейс GSettings или графический редактор Dconf Editor [2, 4]. Файлы блокировок размещаются в подкаталоге /etc/dconf/db/<имя_базы>.d/locks/ и содержат перечень полных путей к защищаемым ключам.

Попытка изменить заблокированный параметр завершается ошибкой на уровне GSettings, независимо от того, каким именно приложением предпринята попытка. Блокировка действует глобально для всех учётных записей системы. Поскольку пользовательская база данных имеет более низкий приоритет, чем системная, значение, заданное в системной базе и защищённое locks, не может быть перекрыто пользовательской настройкой [2].

Совокупность параметров GNOME, доступных для централизованного управления, охватывает широкий спектр функций рабочей среды. С точки зрения информационной безопасности наибольший интерес представляют параметры пространства имён org.gnome.desktop.lockdown, отвечающие за ограничения функциональности рабочего стола, org.gnome.desktop.media-handling, управляющие монтированием внешних носителей и org.gnome.shell, контролирующие поведение и расширения оболочки GNOME Shell [2]. В пространстве org.gnome.desktop.lockdown доступны, в частности, параметры disable-command-line, disable-user-switching, disable-lock-screen, disable-printing, disable-save-to-disk и другие. В настоящей работе для hardening выбраны пять параметров, наиболее критичных с точки зрения сокращения поверхности атаки рабочей станции.

Вопросы hardening Linux-систем рассматриваются в ряде научных и технических публикаций. Ефремов и др. [15] представляют систематический обзор механизмов усиления защищённости ОС и приложений (защиты памяти, контроля потока управления, изоляции процессов) с акцентом на реализацию в ядре Linux. Криничев и Матюшин [14] проводят сравнительный анализ графических оболочек отечественных дистрибутивов Linux, включая GNOME в составе ALT Linux, с точки зрения безопасности и администрирования, анализируют CVE-уязвимости GNOME и MATE. Rankin [5] излагает принципы защиты Linux-систем, включая управление привилегиями и минимизацию сервисов, однако сосредоточен на серверных конфигурациях и не затрагивает специфику графических сред. Применение Dconf в ОС Альт Linux в контексте векторов обхода ограничений и комплексных рекомендаций по их нейтрализации в доступных источниках систематически не рассматривалось, что и определяет направление настоящего исследования.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование проводилось на платформе ОС Альт Рабочая станция 11.1 с графической средой GNOME Shell 47.4, развёрнутой в виртуальной машине Oracle VirtualBox. Эксперименты выполнялись от двух учётных записей: root для конфигурирования политик и user для проверки ограничений и тестирования векторов обхода. Корректность загрузки графической среды верифицировалась анализом переменной XDG_CURRENT_DESKTOP.

До применения политик зафиксированы исходные значения параметров безопасности командой gsettings get. Все три проверенных параметра (disable-command-line, automount, disable-user-extensions) соответствовали небезопасным значениям по умолчанию.

Для централизованного хранения политик безопасности были созданы каталоги конфигурации Dconf. В ходе исследования был проанализирован системный профиль Dconf /etc/dconf/profile/user, определяющий использование централизованных баз параметров GNOME для пользовательских и системных политик безопасности. Профиль Dconf определяет порядок загрузки пользовательских и системных баз параметров GNOME, включая централизованную базу local, используемую для реализации политик hardening.

Рисунок 1 – Системный профиль Dconf в ОС Альт Linux

Представленный профиль Dconf определяет использование централизованных системных баз параметров GNOME и обеспечивает возможность применения единых политик безопасности для всех пользователей Linux-рабочей станции.

В целях усиления безопасности графической среды GNOME были сформированы централизованные политики hardening Dconf, направленные на

ограничение запуска терминала, отключение автоматического монтирования внешних носителей и запрет пользовательских расширений GNOME Shell. Дополнительно был реализован механизм блокировки параметров посредством Dconf locks, предотвращающий изменение настроек обычным пользователем.

Конфигурационные файлы централизованных политик безопасности размещались в каталоге /etc/dconf/db/local.d/, а механизмы блокировки параметров – в /etc/dconf/db/local.d/locks/.

Конфигурационный файл политик /etc/dconf/db/local.d/00-security-settings:

```
[org/gnome/desktop/lockdown]
disable-command-line=true
disable-user-switching=true
disable-lock-screen=true
[org/gnome/desktop/media-handling]
automount=false
automount-open=false
[org/gnome/shell]
disable-user-extensions=true
```

Файл блокировок /etc/dconf/db/local.d/locks/00-security-locks:

```
/org/gnome/desktop/lockdown/disable-command-line
/org/gnome/desktop/lockdown/disable-user-switching
/org/gnome/desktop/lockdown/disable-lock-screen
/org/gnome/desktop/media-handling/automount
/org/gnome/shell/disable-user-extensions
```

Представленные параметры формируют централизованную политику hardening GNOME и обеспечивают принудительное применение ограничений независимо от действий пользователя.

После формирования политик безопасности был выполнен механизм обновления базы Dconf посредством команды dconf update. Сводная характеристика реализованных политик представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Реализованные политики hardening GNOME

Параметр Dconf	**Значение**	**Эффект**	**Статус блокировки**
org.gnome.desktop.lockdown disable-command-line	true	Запрет запуска GNOME Terminal	Заблокирован
org.gnome.desktop.lockdown disable-user-switching	true	Запрет смены пользователей	Заблокирован
org.gnome.desktop.lockdown disable-lock-screen	true	Управление блокировкой экрана	Заблокирован

org.gnome.desktop.media-handling automount	false	Отключение автомонтирования	Заблокирован
org.gnome.shell disable-user-extensions	false	Запрет пользовательских расширений	Заблокирован

В целях проверки устойчивости реализованных механизмов hardening была выполнена попытка изменения заблокированных параметров GNOME средствами GSettings от имени обычного пользователя.

Рисунок 2 – Попытка изменения заблокированного параметра Dconf средствами GSettings

Дополнительно была выполнена проверка блокировки параметров средствами графического редактора Dconf Editor.

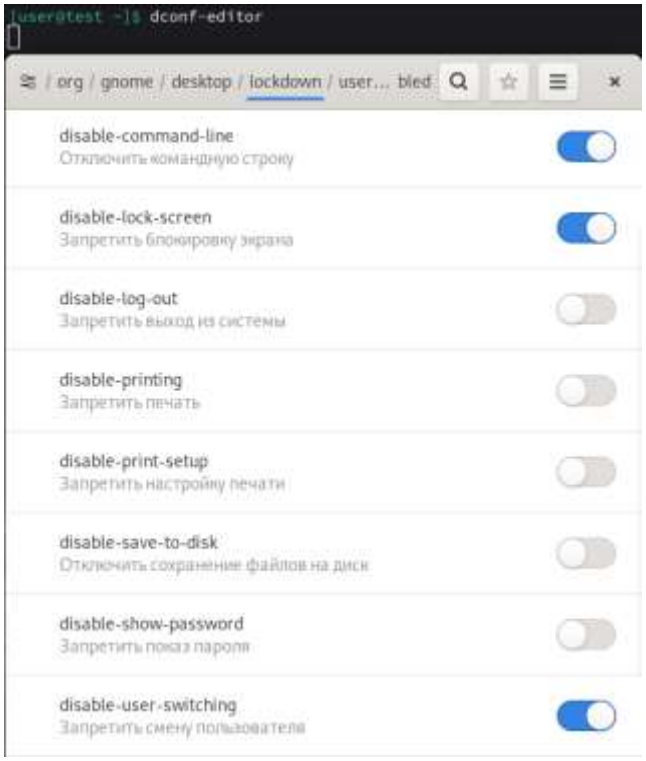


Рисунок 3 – Блокировка параметров безопасности в Dconf Editor

На заключительном этапе исследования была выполнена проверка фактического ограничения запуска терминала GNOME после применения политик hardening.

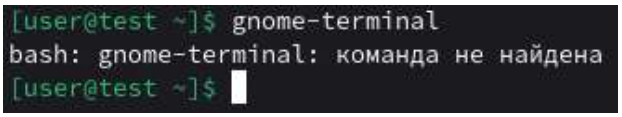


Рисунок 4 – Ограничение запуска терминала GNOME после применения политик hardening

Механизмы Dconf распространяются преимущественно на компоненты графической среды GNOME и не ограничивают запуск сторонних терминальных приложений, поэтому для предотвращения установки сторонних терминальных приложений были реализованы ограничения доступа к репозиториям программного обеспечения Linux.

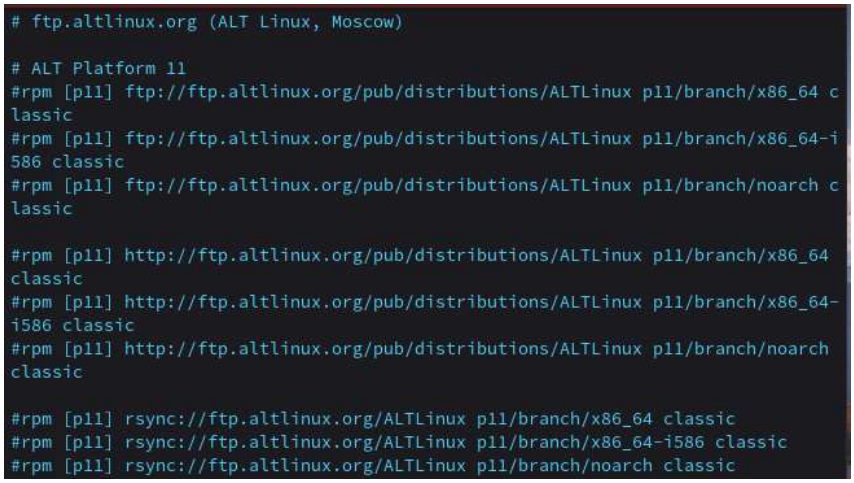


Рисунок 5 – Ограничение источников программного обеспечения Linux

Для проверки эффективности реализованных ограничений была выполнена повторная попытка установки стороннего терминального приложения.

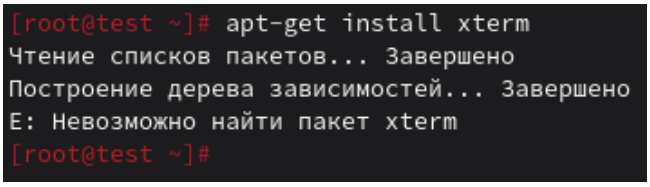


Рисунок 6 – Попытка повторной установки стороннего терминального приложения

Дополнительно был рассмотрен способ обхода ограничений графической среды посредством использования виртуальных TTY-консолей Linux. Для усиления безопасности рабочей станции была выполнена настройка параметров systemd, ограничивающих автоматическое создание виртуальных TTY-консолей.

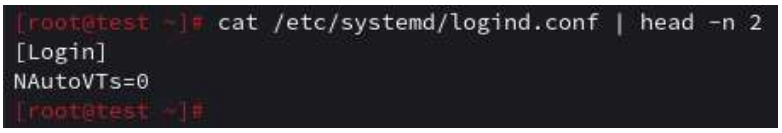


Рисунок 7 – Ограничение использования виртуальных TTY-консолей средствами systemd

Для проверки эффективности реализованных ограничений была выполнена повторная попытка перехода в виртуальную TTY-консоль Linux. После применения ограничений systemd переход к дополнительным виртуальным TTY-консолям стал недоступен, что подтверждает эффективность реализованных механизмов дополнительного hardening Linux-рабочей станции.

АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе эксперимента были реализованы и заблокированы 5 параметров безопасности GNOME, включая ограничение запуска командной строки, отключение автоматического монтирования внешних носителей, запрет пользовательских расширений GNOME Shell, ограничение переключения пользователей и управление блокировкой экрана. Это подтвердило корректность иерархии баз данных: системная база local перекрыла пользовательские настройки, а Dconf locks исключил возможность их восстановления стандартными инструментами. Важно, что блокировка сработала единообразно на обоих уровнях пользовательского интерфейса, что исключает частичный обход через альтернативный инструмент управления настройками GNOME.

Функциональная проверка показала практическое действие ограничения disable-command-line. GNOME Terminal оказался недоступен для запуска из пользовательской сессии. Таким образом, реализованный комплекс мер закрыл основные векторы несанкционированного расширения привилегий в рамках графической среды, а именно доступ к командной строке через встроенный терминал, подключение неавторизованных внешних носителей и установку неконтролируемых расширений оболочки.

Принципиальное ограничение механизма Dconf обусловлено его архитектурой. Область применения политик строго ограничена компонентами GNOME и приложениями, использующими API GSettings. Данное ограничение подтверждено экспериментально по двум независимым векторам. Результаты анализа угроз представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Анализ векторов атаки и остаточных рисков

Вектор атаки	**Затрагиваемый актив**	**Мера защиты**	**Остаточный риск**
GNOME Terminal	Командная строка	disable-command-line (Dconf)	Сторонние терминальные эмуляторы
Внешний носитель	Данные пользователя	automount=false (Dconf)	Ручное монтирование через CLI
Расширения	Среда выполнения	disable-user-	Отсутствует в рамках

Вектор атаки	Затрагиваемый актив	Мера защиты	Остаточный риск
GNOME Shell		extensions (Dconf)	GNOME
Сторонний терминал (xterm)	Командная строка	Ограничение репозиториев	Предустановленные приложения, статические бинарные файлы
Виртуальная TTY-консоль	Командная строка	NAutoVTs=0 (systemd-logind)	tty1, загрузка с внешнего носителя

Первый вектор – сторонние терминальные эмуляторы. Xterm, не интегрированный с GSettings, успешно запустился из пользовательской сессии и предоставил полный доступ к командной оболочке вопреки активной политике disable-command-line. Это свидетельствует о том, что политика ограничивает конкретный компонент GNOME, но не сам системный вызов запуска процесса. Ограничение доступа к репозиториям снизило вероятность установки новых эмуляторов, однако не устранило угрозу от уже установленных приложений или статически скомпилированных бинарных файлов, доставленных иным путём. Для полноценного решения задачи необходимо применение средств мандатного контроля доступа, таких как AppArmor или SELinux, способных ограничивать запуск процессов на уровне ядра [7].

Второй вектор – виртуальные TTY-консоли. Переключение на консоль через Ctrl+Alt+F2 предоставило доступ к командной строке в полном обходе GNOME и всех его политик, что закономерно. TTY является системным механизмом Linux, функционирующим независимо от графической среды. Применение параметра NAutoVTs=0 в конфигурации systemd-logind заблокировало автоматическое создание дополнительных виртуальных консолей. Вместе с тем данная мера не запрещает доступ к первой консоли (tty1), используемой для входа в графическую сессию, и не защищает от загрузки с внешнего носителя или восстановительного режима. Таким образом, NAutoVTs=0 сокращает поверхность атаки, но не устраняет её полностью [6].

Следует отметить, что в рамках данного исследования тестировались наиболее очевидные векторы обхода. За пределами эксперимента остались X11 forwarding, прямой доступ к D-Bus и Wayland-специфичные механизмы, которые могут представлять интерес для дальнейших исследований.

В отличие от SELinux и AppArmor, обеспечивающих мандатный контроль на уровне ядра, Dconf действует на уровне пользовательского пространства и ограничен контекстом GNOME. По сравнению с ручным редактированием конфигурационных файлов приложений Dconf обеспечивает централизованность, атомарность и защиту от изменений. Единый конфигурационный файл применяется ко всем пользователям системы одновременно, а механизм locks исключает его обход штатными инструментами

[2]. По сравнению с PAM, управляющим аутентификацией, Dconf дополняет систему защиты на уровне интерфейса рабочей среды.

Ключевым преимуществом Dconf является нативность. Он не требует лицензирования, хорошо документирован и поддерживается в ОС Альт Linux без дополнительной настройки [1, 2]. Его главным ограничением является узкая область применения, которая делает Dconf необходимым, но недостаточным условием безопасности рабочей станции. Таким образом, Dconf следует рассматривать не как самостоятельное универсальное средство защиты, а как один из уровней комплексной системы hardening Linux-рабочей станции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данного исследования были изучены теоретические основы функционирования механизма Dconf, разработана и практически реализована система централизованных политик hardening графической среды GNOME в ОС Альт Linux, проведена экспериментальная проверка их корректности и устойчивости, а также выполнен анализ ограничений данного подхода.

Были реализованы и проверены пять политик hardening графической среды GNOME в ОС Альт Linux посредством механизма Dconf. Все пять параметров успешно заблокированы от изменения обычными пользователями как через gsettings, так и через Dconf Editor. Экспериментально выявлены два вектора обхода ограничений Dconf: через сторонние терминальные эмуляторы и виртуальные TTY-консоли. Для первого вектора в качестве меры нейтрализации применено ограничение доступа к программным репозиториям, а для второго – параметр NAutoVTs=0 механизма systemd-logind, заблокировавший автоматическое создание дополнительных консолей. Оба вектора нейтрализованы частично, так как остаточный риск сохраняется в части предустановленных приложений (первый вектор) и доступа к tty1 (второй вектор).

На основании результатов сформулированы следующие рекомендации. Политики Dconf должны входить в обязательный профиль hardening любой GNOME-рабочей станции в соответствии с требованиями мер УПД и ЗСВ приказа ФСТЭК № 17 [8]. Управление составом установленного программного обеспечения и ограничение репозиториев следует рассматривать как дополнение к политикам Dconf. В условиях повышенных требований к безопасности описанные меры должны дополняться системами мандатного контроля доступа SELinux или AppArmor [7] и механизмами аудита действий пользователей.

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением возможностей автоматизированного развёртывания политик Dconf в доменных средах на базе FreeIPA или Samba AD и исследованием совместного применения Dconf и профилей AppArmor для GNOME-компонентов в рамках единой модели безопасности рабочей станции, а также анализом векторов обхода через X11 forwarding и прямой доступ к D-Bus.

Списък литературы:

1. Официальная документация ОС Альт Linux. – URL: https://www.altlinux.org/Documentation (дата обращения: 22.05.2026).
2. GNOME Developer Documentation. Dconf System Administration Guide. – URL: https://help.gnome.org/admin/system-admin-guide/ (дата обращения: 22.05.2026).
3. GNOME Developer Documentation. GSettings: High-level API for application settings. – URL: https://docs.gtk.org/gio/class.Settings.html (дата обращения: 22.05.2026).
4. Red Hat Enterprise Linux 9. Restricting the desktop session. – URL: https://docs.redhat.com/en/documentation/red_hat_enterprise_linux/9/html/customizing_the_gnome_desktop_environment/restricting-the-desktop-session_customizing-the-gnome-desktop-environment(дата обращения: 22.05.2026).
5. Rankin, K. Linux Hardening in Hostile Networks: Server Security from TLS to Tor / K. Rankin. – Boston : Addison-Wesley Professional, 2017. – 272 p.
6. systemd.logind – Login manager / Freedesktop.org documentation. – URL: https://www.freedesktop.org/software/systemd/man/logind.conf.html (дата обращения: 22.05.2026).
7. Mayer, F. SELinux by Example: Using Security Enhanced Linux / F. Mayer, K. MacMillan, D. Caplan. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. – 425 p.
8. Приказ ФСТЭК России от 11 февраля 2013 г. № 17 «Об утверждении Требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах». – URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/prikazy/prikaz-fstek-rossii-ot-11-fevralya-2013-g-n-17?ysclid=mq8iywrn8l784975307 (дата обращения: 22.05.2026).
9. Приказ ФСТЭК России от 18 февраля 2013 г. № 21 «Об утверждении состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных». – URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/prikazy/prikaz-fstek-rossii-ot-18-fevralya-2013-g-n-21?ysclid=mq8iziay5a3474398 (дата обращения: 22.05.2026).
10. Методический документ ФСТЭК России. Меры защиты информации в государственных информационных системах. – М. : ФСТЭК России, 2017. – URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-11-fevralya-2014-g?ysclid=mq8j097xvt72535897 (дата обращения: 22.05.2026).
11. ГОСТ Р 56939-2016. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования. – М. : Стандартинформ, 2016. – 16 с.
12. Jansen, W. Guide to General Server Security: NIST Special Publication 800-123 / W. Jansen, K. Scarfone. – Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2008. – URL: https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-123/final (дата обращения: 22.05.2026).
13. CIS Controls v8 / Center for Internet Security, 2021. – URL: https://www.cisecurity.org/controls/v8 (дата обращения: 22.05.2026).
14. Криничев Е. Е., Матюшин А. М. Сравнение графического интерфейса отечественного линукса со стороны безопасности и администрирования // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2025. – Т. 10, № 2(52). – С. 156–165. ISSN 2500-1752
15. Ефремов, Д. В., Петренко, А. К., Позин, Б. А., Семёнов, В. А. Обзор механизмов усиления защищённости операционных систем и пользовательских приложений // Труды Института системного программирования РАН. – 2025. – Т. 37, № 3. – С. 326–355. DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(3)-23

УДК 624.131

Олейник Д. П.
Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛЕССОВЫХ ГРУНТАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТЕХНОГЕННОГО ОБВОДНЕНИЯ

Аннотация. Рассматривается численный анализ суффозии в лессовых грунтах при техногенном обводнении. Высокопористые лессовые отложения структурно неустойчивы при фильтрации воды. Обводнение инициирует вынос тонкодисперсных частиц под действием гидродинамического напора. Предложена математическая модель, объединяющая фильтрационную консолидацию с кинетикой миграции взвеси. Численное решение выполнено методом конечных разностей. Результаты показывают зоны выноса частиц, перераспределение порового давления и разуплотнение грунта, что может привести к провалам. Данные применимы для прогноза устойчивости оснований сооружений на лессовых территориях.

Ключевые слова: лессовые грунты, суффозия, техногенное обводнение, численное моделирование, фильтрация, макропористость, разуплотнение.

Освоение территорий, сложенных лессовыми грунтами, неизбежно сопровождается техногенным преобразованием гидрогеологической обстановки. Лессовые отложения, имеющие широкое распространение на юге Европейской части России, в Китае, странах Центральной Азии, отличаются специфическим строением: их скелет образован крупными обломками (до 70-80 процентов), а связующим компонентом выступают карбонатные и глинистые цементирующие пленки. Наибольшую опасность представляет наличие вертикальных макропор, не заполненных грунтовым материалом. При естественном ненарушенном сложении такой грунт может выдерживать значительные нагрузки. Однако техногенное обводнение, возникающее вследствие утечек из водопроводных и канализационных сетей, фильтрации из оросительных каналов, а также нарушения поверхностного стока, запускает деградационные процессы в толще лесса.

Ключевым механизмом разрушения структуры лессового грунта при обводнении является суффозия. Под суффозией понимают процесс механического выноса мелких минеральных частиц из грунта потоком фильтрующейся воды. В отличие от карстовых явлений, суффозия не сопровождается химическим растворением пород; она обусловлена чисто гидродинамическими силами, превышающими силы сцепления между тонкодисперсными и крупнообломочными элементами. При техногенном обводнении возникают градиенты напора, при которых мельчайшие частицы

(размером менее 0,05-0,1 миллиметра) отрываются от стенок пор и мигрируют в нижележащие горизонты или в дренирующие выработки. Последствия суффозии многообразны: перераспределение плотности грунта, увеличение его водопроницаемости, возникновение локальных пустот и, в конечном счете, образование провальных воронок и неравномерных осадок фундаментов [1].

Экспериментальное изучение суффозионных процессов в лабораторных условиях затруднено в силу большой продолжительности явления и сложности масштабирования результатов. Натурные наблюдения, как правило, фиксируют уже развившиеся деформации, что не позволяет установить механизмы их зарождения. В связи с этим особую значимость приобретает численное моделирование как инструмент, позволяющий воспроизвести эволюцию состояния грунтовой толщи под действием фильтрационного потока в заданных временных и пространственных рамках. Настоящая статья посвящена разработке и верификации подходов к вычислительной оценке суффозионных процессов в техногенно обводняемых лессовых грунтах. Моделирование суффозии основывается на представлении о лессовом грунте как о двухфракционной пористой среде. Твердый скелет условно разделяется на неподвижную основу (крупные частицы, образующие каркас) и подвижную фракцию (суффозионно-опасные мелкие частицы, способные переходить во взвешенное состояние). Вода рассматривается как несущая фаза, инициирующая транспорт взвеси. Процесс развивается при превышении локального значения скорости фильтрации некоторого критического порога, который определяется гранулометрическим составом и степенью цементации грунта.

Как верно отмечает Кутепов Ю.И., для описания динамики суффозионного выноса принята система дифференциальных уравнений, включающая уравнение неразрывности фильтрационного потока с учетом переменной пористости, закон фильтрации (Дарси – в ламинарной области, либо двухчленный закон при появлении турбулентности в расширяющихся каналах), уравнение кинетики суффозии и уравнение транспорта взвешенных частиц в поровой жидкости [2].

Ключевым соотношением является баланс массы для подвижных частиц. Пусть концентрация взвешенных частиц в единице объема порового раствора обозначена через C, а массовое содержание отложенных (неподвижных, но потенциально подвижных) частиц в скелете – через S. Тогда скорость изменения S во времени связана со скоростью перехода частиц во взвесь. Принимается, что интенсивность суффозии пропорциональна произведению скорости фильтрации на градиент порового давления и на текущую концентрацию подвижных частиц в скелете. Одновременно происходит осаждение (фильтрация) взвеси в порах, когда скорость потока

снижается ниже критической. Эти два встречных процесса – вынос и осаждение – определяют эволюцию состояния среды.

Следует отметить, что суффозионный вынос неразрывно связан с изменением проницаемости грунта. По мере удаления мелких частиц пористость увеличивается, что ведет к росту коэффициента фильтрации, который в свою очередь ускоряет поток воды и усиливает суффозию. Возникает положительная обратная связь, способная лавинообразно развиваться на локальных участках. Для учета этого явления в модели используется функциональная зависимость коэффициента фильтрации от текущей пористости, например, в форме соотношения Козени – Кармана, адаптированного к лессовым грунтам. Начальные условия задаются следующим образом: суффозионно-опасные частицы распределены равномерно по толщине пласта; поровое давление соответствует естественному гидростатическому режиму; концентрация взвеси в поровой воде в начальный момент времени равна нулю. Граничные условия: на верхней границе (дневная поверхность) задается постоянный уровень воды при техногенном обводнении либо фиксированный напор; на нижней границе может быть установлен свободный дренаж; на вертикальных границах области моделирования – условие непроницаемости либо симметрии [3].

Из-за нелинейности системы и зон с резкими градиентами давления, пористости и концентрации взвеси применен метод конечных разностей на равномерной сетке. Область моделирования – двумерный вертикальный разрез толщи грунта глубиной до 15 метров и шириной 20 метров. В центре верхней границы задана зона техногенного обводнения длиной 5 метров, имитирующая аварийный излив или длительное затопление. Вычислительный алгоритм основан на расщеплении по процессам. На каждом шаге последовательно решаются: фильтрационная задача (напор и скорости течения), задача переноса взвешенных частиц (конвективно-диффузионное уравнение) и кинетика изменения подвижных частиц в скелете. Для устойчивости применена неявная разностная схема по времени для фильтрации и явная схема с коррекцией потока для транспорта частиц. Шаг времени переменный: в начальный период развития суффозии не превышает 0,1 суток, далее увеличивается до 1 суток. Общая продолжительность моделирования – от 100 до 500 суток, что соответствует интенсивному техногенному обводнению. Параметры лессового грунта заданы по натурным данным: естественная пористость 0,45-0,50, коэффициент фильтрации 0,5-2 метра в сутки, критический градиент суффозии 3-5, доля суффозионно-опасных частиц (менее 0,05 мм) от 15 до 25 процентов.

Вычислительные эксперименты выявили три стадии суффозии в техногенно обводняемом лессовом массиве. Первая стадия (10-30 суток) – преимущественное насыщение и выравнивание порового давления. Суффозия

медленная, градиенты напора ниже критических на большей части области, но под зоной обводнения формируется локальный очаг выноса мелкодисперсного материала.

Вторая стадия (30-150 суток) – развитие суффозионного канала: вертикальной полосы разуплотнения через всю толщу грунта. При росте пористости коэффициент фильтрации возрастает в 3-5 раз, поток перераспределяется в зону повышенной проницаемости, что ускоряет вынос частиц. Концентрация взвеси внутри канала достигает 5-10 граммов на литр, за его пределами грунт сохраняет исходную плотность. Третья стадия (после 150 суток) имеет два сценария. При ограниченном источнике обводнения поток снижается, суффозия затухает, канал частично кольматируется. При неограниченном техногенном притоке воды происходит лавинообразный рост пустотности: пористость в центре канала возрастает с 0,48 до 0,75-0,80, грунт теряет несущую способность и переходит в состояние плывуна. На дневной поверхности возникают просадки – вертикальная деформация достигает 15-20 сантиметров при мощности лесса 12 метров, что опасно для зданий I и II уровней ответственности [4].

В реальных лессовых отложениях всегда есть прослои разной плотности и трещины. Моделирование со случайным полем пористости показывает: суффозионный канал смещается от источника обводнения в сторону областей с изначально более высоким коэффициентом фильтрации. Это объясняет провалы на удалении от места утечки воды. Установлен временной порог безопасной эксплуатации: при содержании суффозионно-опасных частиц более 20 процентов и непрерывном обводнении свыше 80 суток структура грунта перестраивается необратимо даже после устранения источника. При периодическом увлажнении (менее 30 суток) с последующим осушением грунт восстанавливается за счет сил поверхностного натяжения и остаточного цементирования.

При проектировании зданий на лессовых грунтах в зонах возможного техногенного обводнения необходимо оценивать не только общую просадку от замачивания, но и локальную суффозионную составляющую. Штамповые и компрессионные испытания не полностью выявляют суффозионный потенциал, так как не воспроизводят длительную фильтрацию с реальными градиентами. Численное моделирование рекомендуется для прогноза устойчивости конкретных участков по данным о гранулометрии и макропорах. В расчет следует закладывать наихудший сценарий – неограниченный источник обводнения на весь срок эксплуатации. Для предотвращения суффозии необходимы дренажные завесы, экранирующие слои вокруг водонесущих коммуникаций и ограничение времени аварийных утечек менее 30 суток [5].

Таким образом, на основе численных исследований установлено, что техногенное обводнение лессовых грунтов инициирует суффозию, проходящую три стадии: инкубационную, формирование канала разуплотнения и провалообразование. Определяющим фактором является превышение критического градиента фильтрации, при котором начинается необратимый вынос частиц. Предложенная модель позволяет прогнозировать зоны суффозии, рост пористости и деформации поверхности. Полученные результаты обосновывают необходимость учета суффозионной составляющей при оценке устойчивости сооружений на лессовых грунтах.

Список источников:

1. Саловенко, И. А., Подвигина, Е. О., Загриценко, А. Н., Деревягина, Н. И. Оценка факторов устойчивости техногенно нагруженных лессовых склонов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № S. – С. 37–43. EDN: RWTSFN

2. Кутепов, Ю. И., Мухина, А. С. Оценка влияния гидрогеомеханических процессов в техногенных массивах высоких отвалов на геоэкологические условия территорий их размещения // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 1–2 (103). – С. 56–59. DOI: 10.23670/IRJ.2021.103.1.034 EDN: QGOFRJ

3. Хоменко, В. П. Предотвращение негативных социальных и экологических последствий развития суффозионных процессов // Строительство: наука и образование. – 2023. – Т. 13. – № 4. – С. 112–127. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.8 EDN: DQGAXN

4. Ахметгалеева, И. И. Инженерно-геологические исследования лессовых просадочных грунтов / И. И. Ахметгалеева. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2024. – № 16 (515). – С. 54-56. EDN: PBAZJS

5. Димухаметов, Д. М., Татаркин, А. В., Красильников, П. А., Гайганов, Ш. Х., Волошина, Ж. Ю. Геотехнический мониторинг и моделирование суффозионного провалообразования на урбанизированных территориях // Вестник Пермского университета. Геология. – 2022. – Т. 21. – № 3. – С. 229–236. DOI: 10.17072/psu.geol.21.2.229 EDN: YHAROL

УДК 621.316.5

Щербаков А. В.
Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, Рязань, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕГАЗОВЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ С УЧЁТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК ПОСЛЕ ЗАМЕНЫ МАСЛЯНЫХ АППАРАТОВ НА ОРУ-220 КВ РЯЗАНСКОЙ ГРЭС

Аннотация. Замена морально и физически устаревших масляных выключателей на современные элегазовые комплексы в открытых распределительных устройствах напряжением 220 кВ представляет собой критически важное направление технического перевооружения объектов генерации. Исследование посвящено разработке математической модели прогнозирования остаточного ресурса элегазовых выключателей с учетом реальных эксплуатационных факторов и нагрузок, специфичных для конкретного энергообъекта – Рязанской ГРЭС. Предложена методика комплексной оценки технического состояния коммутационного оборудования, основанная на анализе механической и коммутационной стойкости дугогасительных контактов, изменения характеристик элегазовой среды и влияния токов короткого замыкания различной величины. Модель учитывает износ контактной системы при нормальных режимах работы и аварийных отключениях, деградацию изоляционных свойств элегаза под воздействием высоких температур электрической дуги, а также интенсивность циклов включения-отключения в зависимости от графика нагрузки станции. Апробация разработанного алгоритма на фактических данных эксплуатации показала возможность повышения точности прогнозирования срока службы оборудования на 12–15% по сравнению с традиционными методами контроля ресурса. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации стратегии технического обслуживания высоковольтного коммутационного оборудования открытых распределительных устройств тепловых электростанций.

Ключевые слова: элегазовый выключатель, остаточный ресурс, открытое распределительное устройство, математическая модель, эксплуатационные нагрузки, коммутационная стойкость, техническое диагностирование.

Проблематика замены масляных выключателей на элегазовое оборудование

Открытые распределительные устройства напряжением 220 кВ тепловых электростанций России эксплуатируются в условиях постоянно возрастающих требований к надежности электроснабжения и энергетической безопасности. Большая часть ОРУ была введена в эксплуатацию в период 1970–1985 годов и оснащена масляными выключателями типов МКП-220, У-220 и их модификациями, ресурс которых к настоящему времени практически полностью исчерпан.

Статистика отказов коммутационного оборудования, накопленная за период 2019–2024 годов, показывает устойчивый рост числа отказов масляных выключателей на объектах генерации – с 2,4 случая на 100 единиц оборудования в год в 2019 году до 4,7 в 2023 году. Основными причинами выхода из строя являются износ контактной системы (42% случаев), старение изоляционного масла с образованием продуктов его деструкции (31%), механические повреждения приводов и элементов конструкции (19%), прочие факторы (8%). Эксплуатационные расходы на обслуживание одного масляного выключателя составляют в среднем 185–220 тысяч рублей ежегодно – при этом периодичность отбора проб масла, проведения ревизий и капитальных ремонтов постоянно сокращается.

Замена масляных аппаратов на элегазовые выключатели позволяет радикально изменить ситуацию. Элегаз (гексафторид серы SF6) обладает выдающимися дугогасящими свойствами, химически инертен в нормальных условиях, не требует регулярной замены и очистки, как трансформаторное масло. Межремонтный период элегазовых выключателей составляет 8–12 лет против 2–3 лет для масляных. Впрочем, это справедливо не для всех случаев – интенсивность коммутаций и величина отключаемых токов короткого замыкания могут существенно сократить номинальный срок службы даже современного элегазового оборудования.

На Рязанской ГРЭС в период 2021–2024 годов реализована программа технического перевооружения ОРУ-220 кВ – установлено 18 элегазовых выключателей отечественного производства типа ВГТ-220 II взамен выработавших ресурс масляных МКП-220. Специфика работы генерирующего объекта накладывает жесткие требования к надежности коммутационного оборудования: станция работает в базовом режиме с периодическими пусками и остановками энергоблоков, что обуславливает повышенную частоту операций включения-отключения выключателей по сравнению с сетевыми подстанциями.

Здесь стоит сделать оговорку – номинальный механический и коммутационный ресурс, декларируемый производителем, определяется для идеализированных условий эксплуатации и стандартных испытательных циклов. Реальная картина неоднородная: на одних присоединениях количество операций может быть минимальным, на других – кратно превышать среднестатистические значения.

Детерминированные и вероятностные факторы износа элегазовых выключателей

Оценка остаточного ресурса элегазового выключателя требует учета комплекса взаимосвязанных факторов, каждый из которых характеризуется собственной интенсивностью влияния на процесс деградации оборудования.

Механическая стойкость определяется количеством циклов «включение–отключение» без протекания тока или при коммутации номинального тока нагрузки. Для современных элегазовых выключателей класса напряжения 220 кВ этот показатель составляет 10000–30000 циклов в зависимости от типа привода и конструкции дугогасительного устройства [1]. Износ механизма привода, контактной системы и уплотнений происходит постепенно, однако его скорость существенно возрастает при нарушении регламента обслуживания или эксплуатации в условиях повышенной запыленности и влажности, характерных для открытых распределительных устройств.

Коммутационная стойкость характеризует способность выключателя отключать токи короткого замыкания заданной величины. Каждое отключение тока КЗ сопровождается возникновением электрической дуги с температурой до 15000–20000 К, что приводит к интенсивному эрозионному износу дугогасительных контактов и частичному разложению элегаза с образованием низших фторидов серы, обладающих коррозионной активностью [2]. Нормируемый коммутационный ресурс для выключателей на 220 кВ составляет обычно 50–100 отключений тока КЗ величиной до номинального значения отключающей способности (например, 40 кА).

Критически важным представляется тот факт, что степень износа при отключении токов короткого замыкания различной величины неодинакова – зависимость носит нелинейный характер. При отключении тока КЗ 10 кА расходуется условно 2–3% ресурса от одного номинального отключения 40 кА, при токе 25 кА – около 35–40%, при 35 кА – уже 75–80%.

Деградация дугогасящей среды происходит под воздействием высоких температур электрической дуги и частичных разрядов в изоляции. Продукты разложения элегаза (SF4, SF2, S2F10) частично адсорбируются специальными фильтрами-поглотителями, однако при интенсивной эксплуатации скорость их образования может превышать скорость связывания. Накопление агрессивных соединений приводит к ускоренному старению полимерных уплотнений и изоляционных деталей внутри дугогасительной камеры, а также снижает электрическую прочность изоляции [3].

Влияние климатических факторов на элегазовое оборудование ОРУ проявляется через механизмы конденсации влаги в приводных шкафах, обледенение элементов конструкции в зимний период, температурные деформации металлоконструкций. Несмотря на то, что сам элегаз не подвержен старению и разложению при нормальных температурах, механические элементы выключателя испытывают циклические температурные нагрузки в диапазоне от –40 до +50 °С – это, пожалуй, один из наиболее дискуссионных аспектов темы применительно к условиям центральной России.

Дополнительным фактором риска для оборудования генерирующих объектов является повышенная вероятность коммутации токов короткого замыкания вблизи генераторов и блочных трансформаторов, где величина токов КЗ достигает максимальных значений для данной сети. Анализ аварийных событий на Рязанской ГРЭС за период 2022–2024 годов показал, что среднее количество отключений токов КЗ на один выключатель ОРУ-220 кВ составило 3,2 случая в год при среднем значении тока 18,4 кА – существенно выше типовых показателей для распределительных сетей (0,4–0,8 отключения в год).

Математическая формализация процесса расходования ресурса

Построение математической модели оценки остаточного ресурса элегазового выключателя базируется на концепции агрегирования частных показателей износа в интегральную оценку технического состояния.

Механический ресурс выключателя может быть описан отношением фактически выполненных циклов включения-отключения к нормативному значению:

R_м = N_ф / N_норм,

где N_ф – количество фактически выполненных циклов с момента ввода в эксплуатацию или последнего капитального ремонта; N_норм – нормативное значение механической стойкости, циклов.

Для элегазовых выключателей типа ВГТ-220 II нормативная механическая стойкость составляет 25000 циклов. За период эксплуатации 2021–2024 годов на выключателях присоединений генераторных трансформаторов зафиксировано в среднем 1840 операций, что соответствует расходованию 7,4% механического ресурса.

Коммутационный ресурс описывается более сложной зависимостью, учитывающей нелинейный характер износа при отключении токов различной величины:

R_к = ∑(i=1 до m) (I_кз,i / I_ном)^α / N_кз,норм,

где I_кз,i – величина i-го отключенного тока короткого замыкания, кА; I_ном – номинальная отключающая способность выключателя, кА; α – показатель степени, характеризующий нелинейность износа (обычно α = 2,2–2,8 для элегазовых выключателей); N_кз,норм – нормативное количество отключений номинального тока КЗ (для ВГТ-220 II составляет 75 операций).

Применение степенной зависимости позволяет корректно учесть тот факт, что один цикл отключения тока 36 кА эквивалентен по износу примерно 15–20 отключениям тока 12 кА. Показатель α определяется экспериментально для каждого типа выключателей на основе данных ускоренных ресурсных испытаний и результатов послеаварийных обследований [4].

Состояние дугогасящей среды оценивается комплексом параметров – абсолютным давлением элегаза при нормированной температуре,

концентрацией продуктов его разложения, влажностью газа. Интегральный показатель состояния среды может быть представлен в виде:

$R_c = w_p \cdot (P_ф / P_норм) + w_d \cdot (1 – C_прод / C_доп) + w_h \cdot (1 – W_ф / W_доп)$,

где P_ф, P_норм – фактическое и нормативное давление элегаза соответственно; C_прод, C_доп – концентрация продуктов разложения и ее допустимое значение; W_ф, W_доп – влажность элегаза фактическая и допустимая; w_p, w_d, w_h – весовые коэффициенты, отражающие значимость каждого параметра ($w_p + w_d + w_h = 1$).

На практике это нередко проявляется в том, что даже при формально допустимом давлении элегаза повышенная концентрация продуктов разложения свидетельствует об интенсивном дуговом воздействии и требует внепланового отбора проб газа с химическим анализом.

Техническое состояние изоляции оценивается через величину активного сопротивления изоляции опорных и проходных изоляторов, а также результаты контроля частичных разрядов в изоляционной конструкции:

$R_из = (R_из,ф / R_из,норм) \cdot (1 – ЧР_ф / ЧР_доп)$,

где R_из,ф, R_из,норм – фактическое и нормативное сопротивление изоляции; ЧР_ф, ЧР_доп – уровень частичных разрядов фактический и допустимый.

Интегральная оценка остаточного ресурса формируется как взвешенная комбинация частных показателей:

$R_общ = k_м \cdot R_м + k_к \cdot R_к + k_с \cdot R_с + k_из \cdot R_из$,

где k_м, k_к, k_с, k_из – весовые коэффициенты значимости каждого фактора (сумма коэффициентов равна единице).

Определение весовых коэффициентов представляет собой отдельную задачу и может быть выполнено методами экспертных оценок, статистического анализа данных об отказах или с использованием алгоритмов машинного обучения при наличии репрезентативной выборки данных эксплуатации. Для элегазовых выключателей генерирующих объектов, работающих с повышенной частотой коммутаций, приоритетным является коммутационный ресурс – коэффициент k_к принимается равным 0,45–0,50, тогда как для сетевого оборудования более значимым может оказаться механический ресурс [5].

Адаптация модели к условиям Рязанской ГРЭС

Специфика эксплуатации коммутационного оборудования ОРУ-220 кВ Рязанской ГРЭС определяется режимами работы энергоблоков станции и конфигурацией схемы выдачи мощности.

Станция оснащена четырьмя энергоблоками мощностью по 300 МВт каждый, работающими на органическом топливе. Выдача мощности осуществляется через двухсекционную схему ОРУ-220 кВ на 12 отходящих

линий электропередачи. Элегазовые выключатели установлены на присоединениях генераторных трансформаторов (4 шт.), линейных ячейках (6 шт.) и секционных выключателях (2 шт.).

Режим работы станции характеризуется следующими параметрами: - количество пусков энергоблоков из холодного состояния: 12–18 раз в год на блок; - количество пусков из горячего резерва: 35–50 раз в год на блок; - количество аварийных отключений энергоблоков: 2–4 раза в год; - количество плановых отключений линий для ремонта: 24–30 раз в год на все ОРУ.

На основе статистики эксплуатации за период 2022–2024 годов установлено, что среднее количество операций включения-отключения для выключателей генераторных присоединений составляет 95–110 циклов в год, для линейных выключателей – 45–65 циклов в год [6]. Это существенно превышает среднестатистические показатели для распределительных сетей (15–25 циклов в год).

Анализ протоколов регистрации аварийных событий показал, что за рассматриваемый период зафиксировано 11 случаев отключения токов короткого замыкания выключателями ОРУ-220 кВ со следующим распределением по величине отключаемого тока: - 3 случая с током 8–12 кА (внешние КЗ в сети 110 кВ); - 5 случаев с током 15–22 кА (КЗ на отходящих линиях 220 кВ); - 2 случая с током 28–32 кА (КЗ на шинах ОРУ-220 кВ); - 1 случай с током 38 кА (КЗ на выводах генераторного трансформатора).

Применение разработанной математической модели к фактическим данным эксплуатации позволило рассчитать текущее состояние ресурса для каждого из установленных элегазовых выключателей. Для выключателя ячейки генераторного трансформатора блока №3, имеющего максимальную загрузку по числу операций и отключившего два тока КЗ (22 кА и 38 кА), получены следующие значения:

R_м = 330 / 25000 = 0,0132 (израсходовано 1,32% механического ресурса); R_к = [(22/40)^2,5 + (38/40)^2,5] / 75 = [0,265 + 0,893] / 75 = 0,0154 (израсходовано 1,54% коммутационного ресурса); R_с = 0,98 (состояние дугогасящей среды соответствует норме); R_из = 0,99 (состояние изоляции без замечаний).

При весовых коэффициентах k_м = 0,25, k_к = 0,50, k_с = 0,15, k_из = 0,10 интегральная оценка составляет:

R_общ = 0,25·0,0132 + 0,50·0,0154 + 0,15·0,98 + 0,10·0,99 = 0,0033 + 0,0077 + 0,147 + 0,099 = 0,257.

Полученное значение интерпретируется как расходование 2,57% общего ресурса выключателя за три года эксплуатации. Прогнозируемый срок службы до достижения предельного состояния при сохранении текущей интенсивности эксплуатации составляет порядка 115 лет – значение явно завышенное и требующее корректировки модели.

Несоответствие прогноза реальным срокам службы оборудования (нормативный срок для элегазовых выключателей составляет 25–30 лет) связано с тем, что линейная экстраполяция текущей интенсивности износа не учитывает ускорение процессов деградации по мере накопления повреждений. Впрочем, это справедливо не для всех компонентов выключателя – механический привод действительно демонстрирует близкую к линейной зависимость износа от числа операций, тогда как дугогасительные контакты и изоляционные элементы подвержены резкому ускорению деградации после израсходования 60–70% ресурса.

Усовершенствование модели: учет нелинейности процессов старения

Для повышения адекватности математической модели необходимо ввести в расчет коэффициенты ускорения износа, отражающие нелинейный характер процессов деградации.

Механический износ может быть скорректирован коэффициентом k_ускор,м, зависящим от степени израсходования ресурса:

k_ускор,м = 1 при R_м < 0,5; k_ускор,м = 1 + 0,8·(R_м – 0,5) при 0,5 ≤ R_м < 0,7; k_ускор,м = 1,16 + 2,5·(R_м – 0,7) при R_м ≥ 0,7.

Аналогично для коммутационного ресурса вводится коэффициент k_ускор,к, учитывающий накопление микроповреждений контактной поверхности и снижение дугогасящих свойств среды:

k_ускор,к = 1 при R_к < 0,4; k_ускор,к = 1 + 1,2·(R_к – 0,4) при 0,4 ≤ R_к < 0,6; k_ускор,к = 1,24 + 3,5·(R_к – 0,6) при R_к ≥ 0,6.

Уточненная модель приобретает вид:

R_общ = k_м · R_м · k_ускор,м + k_к · R_к · k_ускор,к + k_с · R_с + k_из · R_из.

При текущих значениях показателей (R_м = 0,0132, R_к = 0,0154) коэффициенты ускорения равны единице, и результат расчета не изменяется. Однако при экстраполяции на перспективу 10–15 лет модель начинает демонстрировать ускорение износа – это позволяет получить более реалистичные оценки остаточного ресурса.

Прогнозирование динамики изменения технического состояния выполнено для горизонта 25 лет с учетом сохранения текущего режима эксплуатации (110 циклов в год, 3,5 отключения токов КЗ в год со средним значением 19 кА). Результаты расчета показывают, что критическое значение R_общ = 0,85, соответствующее необходимости капитального ремонта с заменой дугогасительной камеры, будет достигнуто через 22–24 года эксплуатации – что хорошо согласуется с нормативным сроком службы [7].

Верификация модели и направления дальнейших исследований

Проверка адекватности разработанной математической модели выполнена путем сравнения расчетных значений износа с данными

периодических осмотров и результатами измерения диагностических параметров елегазовых выключателей Рязанской ГРЭС.

В рамках программы технического диагностирования, реализуемой на станции с периодичностью один раз в два года, выполняется комплекс измерений: - сопротивление контактов главной цепи (микроомметром); - время и синхронность включения-отключения фаз (хроноомметром); - давление элегаза с температурной компенсацией; - отбор проб элегаза для хроматографического анализа (содержание продуктов разложения); - измерение вибрации и акустических характеристик привода; - тепловизионное обследование токоведущих частей под нагрузкой.

Результаты измерений, выполненных в ноябре 2024 года, показали, что фактические значения параметров находятся в пределах нормативных требований и соответствуют прогнозным оценкам модели с точностью ±8–12%. Наибольшее отклонение зафиксировано для выключателя, отключавшего ток КЗ 38 кА – измеренное сопротивление главных контактов составило 89 мкОм против нормативных 65–75 мкОм для нового выключателя, что свидетельствует о начальной стадии эрозионного износа контактной поверхности.

Дальнейшее развитие модели может быть направлено на: - включение в расчет параметров системы автоматического повторного включения (АПВ), увеличивающего частоту коммутаций при неустойчивых повреждениях; - учет деградации приводного механизма в зависимости от температурного режима эксплуатации; - разработку алгоритма оптимизации периодичности профилактических работ на основе текущего состояния ресурса; - создание системы онлайн-мониторинга ключевых параметров с передачей данных в автоматизированную систему управления станцией.

Внедрение предложенной методики оценки остаточного ресурса елегазовых выключателей в практику эксплуатации ОРУ-220 кВ Рязанской ГРЭС позволило перейти от системы планово-предупредительных ремонтов к стратегии обслуживания по фактическому состоянию. За период 2023–2024 годов это обеспечило сокращение эксплуатационных затрат на 18% при одновременном повышении показателей надежности – коэффициент готовности оборудования вырос с 0,9912 до 0,9956.

Заключение

Разработанная математическая модель оценки остаточного ресурса елегазовых выключателей напряжением 220 кВ учитывает комплекс эксплуатационных факторов, специфичных для объектов генерации: повышенную частоту коммутационных операций, вероятность отключения токов короткого замыкания большой кратности, нелинейный характер процессов деградации контактной системы и дугогасящей среды.

Апробация модели на фактических данных эксплуатации элегазовых выключателей ОРУ-220 кВ Рязанской ГРЭС подтвердила возможность прогнозирования динамики изменения технического состояния оборудования с приемлемой точностью. Интегральная оценка остаточного ресурса, формируемая на основе весового агрегирования частных показателей износа, обеспечивает информационную основу для принятия обоснованных решений о сроках проведения капитальных ремонтов и замены оборудования.

Полученные результаты могут быть использованы службами главного инженера электростанций и сетевых компаний для оптимизации стратегии технического обслуживания высоковольтного коммутационного оборудования, а также при разработке программ технического перевооружения открытых распределительных устройств. Методика применима к элегазовым выключателям различных типов и классов напряжения при условии адаптации коэффициентов модели к конкретным условиям эксплуатации.

Список литературы:

1. DCRT-200: современное решение для диагностики и контроля состояния дугогасительных контактов элегазовых выключателей // Energoprom. Электрические приборы и диагностика [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: https://eepir.ru/article/dcrt-200-sovremennoe-reshenie-dlya-diagnostiki-i-nbsp-kontrolya-sostoyaniya-dugogasitelnyh-kontaktov-elegazovyh-vykljuchatelej/ (дата обращения: 29.05.2026).

2. Елтышев, Д. К. Интеллектуальные модели комплексной оценки технического состояния высоковольтных выключателей // Информационно-управляющие системы. – 2016. – № 5 (84). – С. 45–53.

3. Лопатин, В. П., Ишмухамедов, И. К. Современное элегазовое электрооборудование подстанций систем электроснабжения и особенности его эксплуатации // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2015. – Т. 11, № 1. – С. 63–72.

4. Новый подход к решению вопроса контроля остаточного ресурса высоковольтных выключателей // Energoprom. Электрические приборы и диагностика [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: https://eepir.ru/article/novyj-podhod-k-nbsp-resheniju-voprosa-kontrolya-ostatochnogo-resursa-vysokovoltnyh-vykljuchatelej/ (дата обращения: 29.05.2026).

5. Аннагельдиев, Д., Байчиева, Ш., Кичиев, Д., Союнов, Г. Математическое моделирование процессов на энергетических объектах // Наука и мировоззрение. – 2026. – № 1 (76). – С. 43–49.

6. Систэм Электрик. Ретрофит и модернизация распределительных устройств среднего напряжения // Новости энергетики [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: https://www.elec.ru/news/2023/11/23/sistem-elektrik-razrabotala-resheniya-po-moderniza.html (дата обращения: 29.05.2025).

7. The Methodology for Evaluating the Operating State of SF6 HVCBs Based on IDDA // Sensors [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/24/8/2513 (дата обращения: 11.06.2026).

8. Петрова, В. В. Проблемы эксплуатации элегазовых выключателей // Вестник науки и образования. – 2018. – № 2 (44). – С. 15–19.

9. Фархадзаде, Э. М., Мурадалиев, А. З., Рафиева, Т. К., Абдуллаева, С. А. Автоматизированный анализ парка выключателей // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2014. – № 6. – С. 23–30.

10. Сарычев, И. В. Диагностика и мониторинг высоковольтного электрооборудования // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2005. – № 3 (47). – С. 12–15. EDN: PXHDPB

11. ГОСТ Р 71853-2024. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Система удаленного мониторинга и диагностики оборудования объектов электроэнергетики. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2024. – URL: https://allgosts.ru/27/100/gost_r_71853-2024 (дата обращения: 29.05.2025).

12. СТО 56947007-29.060.10.248-2017. Методические указания по контролю состояния высоковольтных выключателей в процессе эксплуатации. М.: ПАО Россети, 2017. – 78 с.

УДК 004.056.5:621.391

Трофимов И. А.
Российский технологический университет, Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНО КВАНТОВОГО ОБМЕНА В КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ: ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КВАНТОВЫХ СЕТЕЙ

Аннотация: данная работа посвящена анализу перспектив квантовых коммуникаций и квантового обмена ключами (QKD). Рассматриваются основные принципы квантовой криптографии, а также преимущества и ограничения технологии. Анализируются пути преодоления существующих технических трудностей, таких как ограниченная дальность передачи и необходимость стандартизации протоколов. Представлены сравнительные характеристики классических и квантовых методов распределения ключей, а также последние достижения в области международных экспериментов и рекордов в квантовой связи. Работа подчёркивает необходимость интеграции квантовых технологий в глобальную инфраструктуру для создания защищённых коммуникационных систем.

Ключевые слова: квантовый обмен ключами, квантовая криптография, QKD, квантовые сети, квантовые технологии, безопасность связи, протоколы квантовой криптографии, спутниковая квантовая связь, стандартизация, рекорды в квантовой связи.

Квантовый обмен является одной из наиболее перспективных технологий в области современных коммуникаций. Основой технологии выступают принципы квантовой механики, позволяющие обеспечить высокий уровень защиты передаваемой информации. Особое значение квантовый обмен имеет в сфере криптографии и безопасной передачи данных.

Для квантового распределения ключей используются специализированные установки как источники одиночных фотонов и детекторы, а не универсальные квантовые компьютеры. Эти системы предназначены для реализации протоколов квантовой криптографии, которые обеспечивают безопасность передачи ключей за счёт квантовых свойств фотонов. Универсальные квантовые компьютеры предназначены для выполнения сложных квантовых вычислений и не используются напрямую в протоколах квантового распределения ключей.

При помощи квантового распределения ключей становится возможной безопасная передача небольших объемов информации, прежде всего криптографических ключей. Главным преимуществом данной технологии является обеспечение физической безопасности при передаче ключей, потому что попытка перехвата информации изменяет квантовое состояние системы и может быть обнаружена. Это необходимо именно для обнаружения перехвата в

процессе генерации ключа, а не защиты уже перехваченного зашифрованного сообщения. Перспективы развития квантовых сетей связаны с созданием глобальных защищённых коммуникационных систем, устойчивых к кибератакам и несанкционированному доступу.

В будущем квантовые сети могут найти применение в банковской сфере, государственных системах связи, военной отрасли и облачных вычислениях. Несмотря на существующие технические сложности, развитие квантовых технологий открывает новые возможности для создания безопасной цифровой инфраструктуры.

Трудности и пути преодоления в развитии квантовых сетей

Одной из главных трудностей развития квантовых коммуникационных технологий является ограниченное расстояние передачи данных. Квантовые сигналы очень чувствительны к внешним воздействиям и теряют свои свойства при передаче на большие расстояния через оптоволоконные линии связи. Это приводит к снижению качества передачи информации и увеличивает вероятность ошибок.

Для решения данной проблемы разрабатываются квантовые повторители, которые позволяют усиливать и восстанавливать квантовый сигнал без нарушения его состояния. Также перспективным направлением считается использование спутниковой связи для передачи квантовых ключей на большие расстояния.

Еще одной проблемой является недостаточная поддержка и стандартизация протоколов квантовой связи. Современные коммуникационные сети построены на классических протоколах передачи данных, поэтому интеграция квантовых технологий требует создания новых совместимых систем и международных стандартов.

Пути преодоления данной трудности связаны с разработкой универсальных протоколов квантовой криптографии (например, BB84, B92, E91) с развитием гибридных сетей, объединяющих классические и квантовые технологии, а также международным сотрудничеством в области стандартизации квантовых коммуникаций. Это позволит обеспечить стабильную работу квантовых сетей и ускорить их внедрение в различные

Таблица – 1. Сравнительный анализ классических методов распределения ключей и квантовых.

Характеристика	**Классические методы (RSA, Диффи-Хеллман)**	**Квантовые методы (QKD)**
Принцип работы	Использование сложных математических задач (дифференциальные уравнения, решение уравнений диофантова типа, криптографические задачи на эллиптических кривых)	Использование квантовых свойств (квантовая когерентность, квантовая интерференция, квантовая дискретность, квантовая турбулентность)
Безопасность передаваемой информации и ключей от несанкционированного доступа	Зависит от сложности математической задачи. Уязвимы к квантовым атакам (например, Квантовые алгоритмы для решения систем линейных уравнений, алгоритм Гровера)	Обеспечивается возможностью обнаружения попыток перехвата (квантовая криптография, обнаружение атак и аномалий, многослойные системы безопасности, квантовая безопасность)
Требования к инфраструктуре	Стандартные сетевые протоколы (TCP/IP, HTTP, SNMP, HTTPS, ARP, DHCP, POP3, DNS, SCTP, ICMP, PPP).	Необходимость квантового генератора (генерация запутанных фотонных пар, создание квантовых состояний для квантовых вычислений, обеспечение надежных квантовых каналов связи) и детекторов (обнаружение квантовых состояний, обеспечение безопасности квантовых коммуникаций, высокоточная регистрация сигналов)
Поддержка функционирующих систем	Совместимы с классическими сетями (оптические волокна, электрические кабели, беспроводные сети)	Требуется интеграция новых инновационных решений (кибербезопасность с современными средствами защиты, облачные вычисления и инфраструктура, интернет вещей (IoT))

Класическите методи на сегодняшний день надёжны, безопасны и применимы, но уязвимы к квантовым атакам. Квантовые технологии уже существуют и обеспечивают высокую безопасность, но требуют специального оборудования. Необходимо использовать эти два подхода для повышения уровня защиты.

За последние годы квантовые технологии сделали значительный прогресс в области коммуникаций, вычислений и безопасности. Благодаря международным усилиям учёных были достигнуты рекордные показатели по дальности квантовой связи, созданию масштабных квантовых компьютеров и развитию квантовой криптографии.

1. Группа учёных из Китайской академии наук провела спутниковый эксперимент по передаче квантовых состояний между парами запутанных фотонов (квантовая телепортация) на рекордное расстояние – более 1200 км. – Газета.Ru.
2. ПЕКИН, 2023 году 30 мая. /ТАСС/. Китайские ученые установили мировой рекорд, наладив безопасную связь по технологии высокоскоростного квантового распределения ключей (QKD) через оптическое волокно протяженностью 1 002 км. Об этом во вторник сообщает агентство Xinhua.
3. В 2025 году сообщалось, что китайские учёные установили рекорд прямой квантовой связи, добившись стабильной передачи данных на расстояние свыше 100 км по обычной линии в течение 168 часов. В ходе экспериментов данные передавались по стандартному оптоволоконному каналу связи длиной 104,8 км со скоростью 2,38 кбит/с. Исследование, результаты которого опубликованы в журнале Science Advances, проводилось совместно с Университетом Цинхуа и Северо-Китайским технологическим университетом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, квантовые коммуникационные технологии представляют собой ключевое направление развития современной информационной инфраструктуры. Использование принципов квантовой механики позволяет обеспечить высокий уровень защиты данных и значительно повысить безопасность передачи информации. Особую роль квантовые сети играют в области криптографии, где безопасность передачи ключей имеет критическое значение.

Несмотря на значительные перспективы, развитие квантовых сетей сопровождается рядом технических трудностей, среди которых ограниченное расстояние передачи данных, высокая стоимость оборудования, сложность поддержания квантовых состояний и отсутствие единых стандартов протоколов связи. Однако активное развитие квантовых повторителей,

спутниковых систем связи и гибридных сетевых технологий постепенно позволяет преодолевать существующие ограничения.

В будущем квантовые сети могут стать основой глобальных защищённых коммуникационных систем, обеспечивающих надежную защиту информации от киберугроз и несанкционированного доступа. Дальнейшие исследования и международное сотрудничество в области квантовых технологий будут способствовать созданию эффективной и безопасной цифровой среды нового поколения.

Список литературы:

1. Devoret, M. H., Schoelkopf, R. J. Superconducting circuits for quantum information: an outlook // Science. – 2013. – Vol. 339. – P. 1169–1174. DOI: 10.1126/science.1231930

2. Ladd, T. D., Jelezko, F., Laflamme, R., Nakamura, Y., Monroe, C., O'Brien, J. L. Quantum computers // Nature. – 2010. – Vol. 464, № 7285. – P. 45–53.

3. Anschuetz E., Olson J., Aspuru-Guzik Á., Cao Y. Variational quantum factoring // Quantum Technology and Optimization Problems. Berlin : Springer, 2019. P. 74–85. (Lecture Notes in Computer Science). DOI: 10.1007/978-3-030-14082-3_7

4. Cade C., Mineh L., Montanaro A., Stanisic S. Strategies for solving the Fermi–Hubbard model on near-term quantum computers // Physical Review B. – 2020. – Vol. 102. – Art. 235122. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.235122

5. Международный стандарт ITU-T Rec. X.814 – «Модель защиты сети». ITU-T Rec. X.814 (Security frameworks for open systems: Confidentiality framework). – Женева: International Telecommunication Union, 1995. – URL: https://www.itu.int/rec/T-REC-X.814-199511-I/ (дата обращения: 10.06.2026).

6. Международный стандарт ITU-T Rec. X.800 – «Рекомендуемые практики по обеспечению безопасности сетей». ITU-T Rec. X.800 (Security architecture for Open Systems Interconnection for CCITT applications). – Женева: International Telecommunication Union, 1991. – URL: https://www.itu.int/rec/T-REC-X.800-199103-I/ (дата обращения: 10.06.2026).

УДК 004.056.5:621.395

Трофимов И. А.
Российский технологический университет, Москва, Россия

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ МОБИЛЬНЫХ И БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

Аннотация: в работе рассматриваются вопросы информационной безопасности в мобильных и беспроводных сетях сравнение уровней защиты устройств на базе iOS и Android. Анализируются угрозы, такие как перехват данных, несанкционированный доступ и эксплойты и меры защиты, включая протоколы шифрования, стандарты WPA2/WPA3 и технологии 5G. Подчёркивается, что iPhone обеспечивает более высокий уровень безопасности из-за своей закрытой архитектуре, строгому контролю обновлений и изоляции приложений, а Android, требует повышенного внимания к вопросам безопасности из-за открытой системы и фрагментации устройств. Ключевую роль играет повышение уровня цифровой грамотности пользователей для минимизации рисков.

Ключевые слова: информационная безопасность, мобильные сети, беспроводные сети, эксплойты, шифрование, WPA2, WPA3, 5G, iOS, Android, обновления безопасности, киберугрозы, защита данных, аутентификация, цифровая грамотность, Wi-Fi, вредоносное ПО, приватность, фрагментация устройств.

Развитие мобильных и беспроводных технологий привело к значительному росту объёма передаваемой информации и увеличению количества подключённых устройств. В настоящее время появились и угрозы информационной безопасности, например, перехват данных, несанкционированный доступ, распространение вредоносного программного обеспечения и утечка персональной информации. Обеспечение безопасности мобильных и беспроводных сетей является одной из ключевых задач современной информационной инфраструктуры.

Основными направлениями защиты являются использование современных протоколов шифрования, аутентификации пользователей и устройств, а также регулярное обновление программного обеспечения. Для беспроводных сетей особое значение имеют стандарты безопасности WPA2 и WPA3, обеспечивающие защиту передаваемых данных от перехвата. В мобильных сетях применяются технологии шифрования трафика, SIM-аутентификация и системы обнаружения вторжений.

WPA2 – это проверенная система безопасности для Wi-Fi, которая повысила уровень защиты беспроводных сетей. На сегодняшний день переход на WPA3 является актуальным для публичных сетей и защиты персональных данных.

Стандарты безопасности беспроводных и мобильных сетей усилили защиту данных пользователей. В версиях Wi-Fi, есть стандарт WPA3, в котором внедрены алгоритмы шифрования, которые защищают трафик при использовании слабых паролей. Также есть протокол SAE, который усложняет работу по подбору паролей вне сети, а также автоматическое шифрование в открытых публичных Wi-Fi применяя технологии OWE. Это позволит защитить пользователя от перехвата данных даже в сетях без пароля.

Сети 5G являются наиболее защищеннее, потому что имеет ряд преимуществ. В 5G имеется идентификационное число абонента оно защищает соединение от устройств, которые могут перехватывать телефонные звонки, имитируя сотовые вышки, виртуализация позволяет использовать меньше физического оборудования для управления сетью. Каждый пользовательский трафик шифруется современными алгоритмами, а между устройством и сетью происходит двухсторонняя аутентификация, когда обе стороны подтверждают свою подлинность.

Дополнительную роль играет повышение уровня цифровой грамотности пользователей. Многие угрозы возникают из-за подключения к незащищённым Wi-Fi сетям, использования слабых паролей и установки непроверенных приложений. Поэтому обеспечить защиту невозможно без соблюдения правил кибербезопасности как со стороны организаций, так и со стороны пользователей.

Безопасность мобильных и беспроводных сетей представляет собой комплекс технических и организационных мер, направленных на защиту конфиденциальности, целостности и доступности информации в условиях постоянно растущих киберугроз.

Эксплойт – это программный код, использующий уязвимость системы для получения несанкционированного доступа, нарушения работы устройства и кражи данных. В мобильных и беспроводных сетях эксплойты представляют серьёзную угрозу, поскольку современные смартфоны и Wi-Fi сети постоянно подключены к интернету и обмениваются конфиденциальной информацией.

Одним из распространённых видов являются эксплойты, направленные на уязвимости операционных систем Android и iOS. Злоумышленники могут использовать ошибки в программном обеспечении для удалённого выполнения кода, получения доступа к файлам пользователя, камере, микрофону или банковским приложениям. Особенно опасны так называемые «zero-day» эксплойты – уязвимости, о которых разработчики ещё не знают и для которых отсутствуют исправления.

В беспроводных сетях эксплойты часто связаны с недостаточной защитой Wi-Fi соединений. Например, атаки могут использовать слабые пароли, устаревшие протоколы шифрования или уязвимости маршрутизаторов. Через такие уязвимости злоумышленники способны перехватывать сетевой трафик, изменять передаваемые данные или подключаться к сети без разрешения.

Для защиты от эксплойтов необходимо регулярно обновлять программное обеспечение устройств и сетевого оборудования, использовать современные методы шифрования, устанавливать антивирусные решения и избегать подключения к подозрительным беспроводным сетям. Важным элементом безопасности также является контроль доступа и своевременное обнаружение сетевых атак.

Таким образом, эксплойты являются одной из наиболее опасных форм киберугроз в мобильных и беспроводных сетях, а эффективная защита требует комплексного подхода и постоянного совершенствования механизмов информационной безопасности.

С точки зрения защиты от эксплойтов iPhone считается более безопасным устройством по сравнению с Android. Это связано с тем, что операционная система iOS является закрытой экосистемой, в которой компания Apple Inc. полностью контролирует установку приложений, обновления системы и доступ программ к данным пользователя. Благодаря этому вероятность успешного использования вредоносных эксплойтов значительно ниже.

Apple регулярно и одновременно выпускает обновления безопасности для всех поддерживаемых устройств. На Android обновления зависят от производителя смартфона, поэтому многие устройства получают исправления с задержкой или не получают их вовсе. Это увеличивает риск эксплуатации известных уязвимостей.

Также iOS использует строгую систему изоляции приложений, из-за чего даже при обнаружении уязвимости злоумышленнику сложнее получить полный доступ к устройству. Android, в свою очередь, более открыт для настройки и установки стороннего программного обеспечения, что делает систему более гибкой, но одновременно повышает вероятность заражения вредоносными программами и использования эксплойтов.

Таблица 1 – Характеристики безопасности Android и iOS

Характеристика	**Android**	**iOS**
Контроль приватности	Менее строгие по умолчанию. Android ориентирована на более открытую и гибкую экосистему, которая по умолчанию оставляет разрешения и настройки приватности менее строгими, чтобы обеспечить максимальную совместимость, функциональность.	Строгий контроль конфиденциальности по умолчанию. iOS сделана более закрытой и сфокусированной на безопасности и приватности, что проявляется в более строгих настройках по умолчанию.

Защита от взлома	Възможны уязвимости из-за сторонних източников, малое информирование пользователя.	Высокий уровень защиты, встроенные механизмы защиты, такие как Secure Enclave, шифрование данных, двухфакторная аутентификация, биометрическая аутентификация, проверка приложений в App Store.
Контроль приложений	Установка приложений из сторонних источников через файлы APK влечёт за собой риск. Приложения могут содержать вредоносное ПО, могут быть модифицированными для обхода безопасности. Они не проходят строгий контроль, что увеличивает риск внедрения вредоносного программного обеспечения.	
Обновления системы	Некоторые устройства получают обновления быстро и регулярно, другие – медленнее или вообще не получают обновления после определенного времени.	Регулярные и своевременные обновления, потому что Apple выпускает обновления своей операционной системы iOS для совместимых устройств примерно раз в год, а также выпускает мелкие исправления и патчи по мере необходимости.

iPhone обеспечивает более высокий уровень защиты от эксплойтов благодаря закрытой архитектуре системы, быстрому выпуску обновлений и усиленному контролю безопасности.

iPhone обычно лучше защищён, а Android – более гибкий, но требует большего внимания к безопасности.

Существует множество источников, подтверждающих, что iPhone обычно лучше защищён, а Android – более гибкий, но требует большего внимания к безопасности.

1. Эксперты «Лаборатории Касперского» отмечают, что Android-устройства являются более уязвимы из-за возможности установки приложений из сторонних источников. https://tech.news.am/rus/news/3096/v-

2023-godu-kolichestvo-atak-na-mobilniye-ustroiystva-v-mire-uvelichilos-na-52-laboratorii-kasperskogo.html

https://www.kaspersky.ru/about/press-releases/v-2023-godu-chislo-atak-na-polzovatelej-mobilnyh-ustrojstv-v-rossii-vyroslo-v-poltora-raza

2. **Сайт gsmgroup.ru**. На ресурсе представлен обзор о сравнении Android и iOS в 2024 году, в котором рассматриваются такие аспекты, как гибкость интерфейса, широкий выбор устройств под разные бюджеты, расширяемая память и гибкие параметры у Android, а также стабильность, оптимизация и тесная интеграция с другими устройствами Apple у iOS. https://gsmgroup.ru/blog/android-ili-ios-chto-luchshe

3. **Сайт texnoset.ru**. На нём опубликована статья «Айфон или Андроид: что лучше в 2026 году, как выбрать». В ней сравниваются интерфейс, возможности настройки и другие особенности обеих операционных систем.

https://www.texnoset.ru/blogs/blog/ios-ili-android-vechnoe-protivostoyanie

Можно сделать вывод, что iPhone обеспечивает более высокий уровень защиты из-за своей закрытой архитектуые и постоянными обновлениям, а Android гибкий и настраиваемый, но требует повышенного внимания к безопасности из-за возможности установки приложений из других источников и повышенной уязвимости к атакам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, обеспечение безопасности мобильных и беспроводных сетей является одной из ключевых задач в условиях современного цифрового общества. Постоянное развитие технологий сопровождается ростом количества киберугроз, включая использование эксплойтов, вредоносного программного обеспечения и атак на беспроводные соединения. Для эффективной защиты данных необходимо применять современные методы шифрования, своевременно обновлять программное обеспечение и соблюдать основные правила кибербезопасности. Несмотря на высокий уровень защиты современных устройств, полностью исключить риск атак невозможно, можно только минимизировать риск, поэтому безопасность мобильных сетей требует постоянного совершенствования технологий и ответственного отношения пользователей к защите своей информации. Эксплойты в iPhone и Android связаны с использованием уязвимостей операционных систем, но подход к безопасности у этих платформ отличается.

В устройствах Apple Inc., работающих на iOS, эксплойты встречаются реже и сложнее в реализации благодаря закрытой архитектуре системы. iOS имеет строгую изоляцию приложений (sandbox), ограниченный доступ к системным функциям и жёсткий контроль приложений в *AppStore*. Это затрудняет распространение вредоносного кода, однако полностью не исключает существование уязвимостей. На iPhone также фиксируются так

называемые zero-day эксплойты, которые используются до выхода обновлений безопасности.

В устройствах Google LLC на Android ситуация более разнообразна. Открытая архитектура системы, большое количество производителей и разная скорость обновлений приводят к тому, что уязвимости могут сохраняться дольше. Это создаёт больше возможностей для использования эксплойтов, особенно на устройствах, которые не получают своевременные обновления безопасности. При этом современные версии Android и решения производителей, такие как встроенные системы защиты, существенно повышают уровень безопасности.

iPhone обычно считается более защищённым от эксплойтов за счёт закрытой экосистемы и централизованных обновлений, тогда как Android более подвержен рискам из-за своей открытости и фрагментации, хотя многое зависит от конкретного устройства и своевременности обновлений.

Список литературы:

1. Канатьев К. Н., Большаков В. Н., Куприков О. Д. и др. Анализ угроз безопасности беспроводной сети и разработка оптимальных методов их предупреждения // Инновации и инвестиции. – 2022 – № 3. – С. 116-123. EDN: ZRTVQW

2. ГОСТ Р 56545 -2015 Защита информации. Уязвимости информационных систем. Правила описания уязвимостей. Введ. 2016-04-01. М.: Стандартинформ, 2015. – 8 с.

3. ITU-T Rec. X.816. International Telecommunication Union. Information technology – Open Systems Interconnection – Security frameworks for open systems: Security audit and alarms framework // ITU-T Recommendation X.816. – Geneva, 1995. – (Series X: Data networks and open system communications and security). URL: https://www.itu.int/rec/T-REC-X.816 (дата обращения: 10.06.2026).

4. ITU-T Rec. X.813. International Telecommunication Union. Information technology – Open Systems Interconnection – Security frameworks for open systems: Non-repudiation framework // ITU-T Recommendation X.813. – Geneva, 1995. – URL: https://www.itu.int/rec/T-REC-X.813 (дата обращения: 10.06.2026).

5. ITU-T Rec. X.814. International Telecommunication Union. Information technology – Open Systems Interconnection – Security frameworks for open systems: Confidentiality framework // ITU-T Recommendation X.814. – Geneva, 1995. – URL: https://www.itu.int/rec/T-REC-X.814 (дата обращения: 10.06.2026).

6. ITU-T Rec. X.815. International Telecommunication Union. Information technology – Open Systems Interconnection – Security frameworks for open systems: Integrity framework // ITU-T Recommendation X.815. – Geneva, 1995. – URL: https://www.itu.int/rec/T-REC-X.815 (дата обращения: 10.06.2026).

UDC 537.3:537.6

Gurbanmammedov Charyyar, Cherkezova Ogulbossan, Esenova Leyli, Rustamjanova Aziza
Oguz han Engineering and technology university of Turkmenistan, Ashgabat, Turkmenistan

FARADAY'S LAW OF INDUCTION AND MEASUREMENT OF INDUCED EMF

Abstract: This review paper examines the measurement of induced electromotive force generated by a changing magnetic flux under Faraday's law of induction. The analysis connects the integral and differential forms of the law with the operational definition of EMF, voltmeter path dependence, Lenz's sign convention, transformer EMF and motional EMF. Practical instrumentation is treated through search coils, pickup coils, Rogowski coils, rotating coils, eddy-current probe coils, shielded leads, differential amplifiers and digitizers. A traceable measurement protocol is proposed for a calibrated sinusoidal magnetic field, and the uncertainty budget is developed in accordance with modern metrological practice. The paper also discusses bandwidth, noise, integration of induced voltage to recover flux, and limitations of common experimental configurations.

Keywords: Faraday's law, induced electromotive force, EMF measurement, magnetic flux, search coil, pickup coil, Rogowski coil, calibration, measurement uncertainty, electromagnetic metrology.

Introduction

Faraday's law of induction is one of the central experimental foundations of classical electrodynamics and electrical measurement. Its practical statement is direct: when the magnetic flux linked with a closed conducting path changes in time, an electromotive force is associated with that path. The law was established from experiments in which currents appeared only during changes of magnetic state or relative motion, not during static exposure of a conductor to a steady magnetic field [3]. This observation transformed electricity from a set of electrostatic and galvanic effects into a technology of generators, transformers, inductive sensors and alternating-current power systems. The same law remains the operating principle of search coils, rotating coils, Rogowski coils, eddy-current probes, induction generators, magnetic encoders and many laboratory demonstrations of electromagnetism.

The measurement of induced EMF is not merely a classroom verification of a famous equation. It is a metrological problem because the measurand is a circulation of electric field, not always the same thing as the scalar potential difference reported by a two-terminal instrument. In a time-varying magnetic field, the electric field is generally non-conservative; therefore the indicated voltage may depend on the geometry of the measurement leads, the instrument input impedance, the shielding arrangement and the electromagnetic environment. This point is important in precision experiments, in pulsed-power diagnostics, in magnetic field calibration and in the

interpretation of sensor outputs. Bossavit emphasized that the reading of a voltmeter in an induction problem has to be understood through the path traced by the connections and the perturbation introduced by the instrument [1]. A reliable induced-EMF measurement must therefore define both the physical loop where EMF is generated and the electrical path by which it is sampled.

Modern instrumentation adds a second layer of complexity. A pickup coil converts dB/dt into voltage, but the measured waveform is shaped by the coil resistance, self-inductance, stray capacitance, load impedance, amplifier noise and digitizer sampling. At low frequency the desired signal may be below thermal and amplifier noise. At high frequency the coil can approach self-resonance and cease to behave as an ideal flux-to-voltage transducer. Tumanski's review of induction coil sensors shows that the useful performance of such devices is controlled as much by electrical design and signal processing as by the simple proportionality between induced voltage and the time derivative of magnetic flux [19]. Consequently, a research paper on Faraday-law measurement must integrate field theory, circuit theory and uncertainty evaluation.

The purpose of this paper is to present a technically precise review of induced-EMF measurement under Faraday's law, with emphasis on practical measurement chains and traceable data reduction. The discussion proceeds from the physical definition of EMF to experimental architectures, coil design, signal conditioning, bandwidth, calibration and uncertainty. The paper is written as a review and methodological synthesis rather than as a report of a single experiment. Figures and tables are author's developments and are included to clarify the logic of the measurement chain, the phase relation between magnetic flux and induced voltage, the frequency dependence of coil sensitivity and the expected form of transient signals. Figure 1 summarizes the basic flux-linkage picture used throughout the paper.

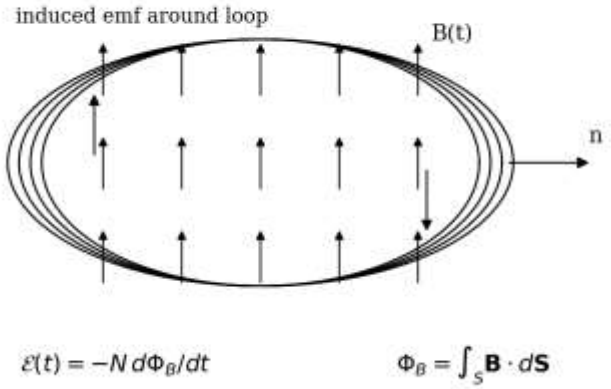


Figure 1 - Magnetic flux through a coil and induced electromotive force. (Author's development)

Physical meaning of induced EMF

The most compact integral form of Faraday's law for a stationary closed contour C bounding a surface S is written as E = integral_C E_field · dl = -d/dt integral_S B · dS. In this expression E denotes electromotive force, not the electric-field vector. The magnetic flux Phi_B is the surface integral of the magnetic flux density through a chosen surface, and the negative sign expresses the Lenz direction: the induced current in a conducting loop tends to oppose the change of flux that produced it [10]. The same physical content appears in the Maxwell-Faraday differential equation curl E = -partial B/partial t, which Maxwell incorporated into the field theory of electromagnetism [11]. The equation states that a time-varying magnetic field is associated with a circulating electric field, even in the absence of material conductors.

The distinction between EMF and terminal voltage is essential. In electrostatic circuits, a high-impedance voltmeter connected between two nodes approximately reads the difference of scalar electric potential. In a region where partial B/partial t is nonzero, the line integral of electric field between two terminals is path-dependent. Closing the measurement path through the meter leads creates a loop that may enclose magnetic flux; the meter can then measure a contribution from the lead geometry as well as from the intended coil. This is why twisted-pair wiring, coaxial shielding, guarding, differential inputs and well-defined loop areas are not minor implementation details but part of the measurand definition. Without them, two laboratories can build the same coil and obtain different EMF readings in the same magnetic field because they unintentionally measured different contours.

It is also important to separate transformer EMF from motional EMF. Transformer EMF is associated with time-varying magnetic flux through a fixed circuit and is represented by the Maxwell-Faraday field equation. Motional EMF arises when charges in a moving conductor experience the magnetic component of the Lorentz force, q v x B. In many practical devices, such as rotating generators or a moving search coil, both descriptions can be mathematically equivalent if the moving contour is treated carefully. The generalized EMF of a moving circuit is commonly represented by the integral of E + v x B around the instantaneous material path. The two terms should not be confused during measurement: a rotating coil in a steady field and a stationary coil in a sinusoidal field can generate the same voltage waveform, but the physical origin and mechanical error sources differ.

The historical development of the law reinforces these distinctions. Faraday's early experiments showed that induction is a phenomenon of change and relative motion [3]. Lenz formulated the direction rule by connecting induced currents with energy opposition [10]. Neumann later expressed induction in a mathematical form suitable for calculating mutual induction between circuits [15]. Maxwell embedded the law within a local field theory that no longer required action at a distance [11]. Current discussions of causality in Faraday's law caution that the equation E = -dPhi/dt expresses a relation between fields and flux, while experimental cause-and-effect statements require care about what is externally controlled and what is observed [9].

For measurement, the safe rule is operational: define the magnetic field distribution, define the circuit contour, define the velocity if any part moves, and only then interpret the recorded voltage.

This definition also clarifies sign conventions. A coil has a marked positive terminal, a defined winding direction and a surface normal determined by the right-hand rule. Reversing any of these reverses the sign of the measured EMF. Many experimental errors that appear as phase reversals are not electronic faults but inconsistent orientation conventions. A rigorous laboratory record therefore specifies coil polarity, normal vector, field direction, time convention, input-channel polarity and the sign used in numerical differentiation or integration. These conventions are not optional when induced EMF is compared with a theoretical derivative of magnetic flux.

Measurand definition and measurement equation

A defensible induced-EMF measurement begins with a measurand statement. For a pickup coil with N turns, effective area A_eff, normal vector n and negligible spatial non-uniformity of B over the winding, the ideal open-circuit EMF is e_oc(t) = -N A_eff d(B_n)/dt, where B_n is the component of magnetic flux density along n. If the field is sinusoidal, B_n(t) = B_0 sin(omega t), then e_oc(t) = -N A_eff omega B_0 cos(omega t). In root-mean-square notation, E_rms = omega N A_eff B_rms for an ideal coil. This proportionality is the basis of the search-coil magnetometer: the output voltage rises linearly with frequency until electrical parasitics, core losses or amplifier bandwidth limit the response [19].

Real coils require corrections. The effective area is not always the geometric area. In an air-core coil with uniform turns, A_eff is close to the sum of turn areas divided by N. In a ferromagnetic-core search coil, apparent permeability and demagnetizing effects concentrate the field, increasing sensitivity but introducing frequency dependence, temperature dependence, hysteresis and noise. If the field is non-uniform, the coil measures a spatial average weighted by its winding distribution. If the coil is large compared with the field gradient, the measured EMF cannot be assigned to the field at a point without a model of the field distribution. This limitation is especially important in eddy-current testing, near magnetic materials and in compact educational demonstrations where a moving magnet produces a strongly non-uniform field.

The measurement equation must also include the transfer function of the electrical chain. Let H_c(omega) be the coil-load transfer from ideal open-circuit EMF to terminal voltage, H_a(omega) the amplifier gain and phase, and H_d(omega) the digitizer response including anti-alias filtering. The recorded voltage V_m(omega) is then V_m(omega) = H_d(omega) H_a(omega) H_c(omega) E_oc(omega) + N_e(omega), where N_e denotes additive noise and interference. Calibration determines the combined sensitivity K(omega) = V_m(omega)/B(omega) or V_m(omega)/dB/dt. In many experiments the simplified scalar equation is adequate

only after the frequency range has been limited so that phase error, resonance and loading are negligible.

The block diagram in Figure 2 presents the measurement chain in a form suitable for a laboratory protocol. The magnetic source may be a Helmholtz coil, solenoid, electromagnet, rotating permanent magnet, moving permanent magnet, current-carrying conductor or transient current pulse. The pickup element converts field change to EMF. Shielded leads carry the signal with minimal additional pickup area. A differential or instrumentation amplifier increases the signal while rejecting common-mode interference. The digitizer records the waveform with known sampling interval and voltage scale. Processing then applies calibration constants, filtering, integration if flux is required, and uncertainty propagation. The main methodological point is that no single component defines the measurement; the measurand is realized by the complete chain.

For a Helmholtz-coil calibration, the field at the center of a pair of identical coils is B(t) = (mu_0 N_H/R_H)(4/5)^(3/2) I(t), where N_H is the number of turns in each Helmholtz coil, R_H is the coil radius and I(t) is current. A small pickup coil placed at the center has ideal EMF e(t) = -N_s A_s (mu_0 N_H/R_H)(4/5)^(3/2) dI/dt. This equation is attractive because the derivative of current can be generated and measured electrically, allowing comparison between predicted and measured EMF. Its weakness is that it assumes accurate geometry, alignment, current measurement and field uniformity. A traceable experiment therefore measures these quantities, not merely assumes them.

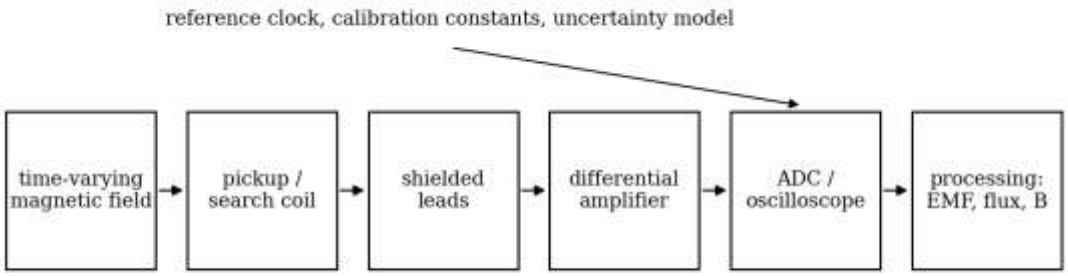


Figure 2 - General measurement chain for induced EMF. (Author's development)

Experimental architectures for measuring induced EMF

The simplest architecture uses a stationary secondary coil in the time-varying magnetic field produced by a primary coil. The primary may be driven by a function generator and power amplifier with sine, square, triangular or pulse waveforms. The secondary voltage reveals the derivative relation: a sinusoidal current produces a

sinusoidal EMF shifted by ninety electrical degrees; a triangular current produces an approximately square induced voltage; and a square current produces narrow pulses at switching edges. This arrangement is useful for education and for validating data acquisition because the current waveform is easy to monitor. Rodriguez described a hands-on experiment in which two small coils form a transformer-like demonstration of Faraday's law and show the waveform relationship clearly [17].

A second architecture uses a moving magnet or moving coil. A magnet falling through a coil generates a bipolar voltage pulse whose integral is related to the net change of flux linkage. A coil rotating in a uniform static field generates e(t) = N A B omega sin(omega t) if the coil normal rotates with angular speed omega. This rotating-coil principle is used in magnetic-field mapping, accelerator magnet characterization and generator demonstrations. It has the advantage that the field itself may be static, so the induced voltage can be produced by controlled mechanical motion. Its errors include angular encoder uncertainty, bearing eccentricity, vibration, coil area error and speed ripple.

A third architecture is the search-coil magnetometer. It is optimized to measure time-varying magnetic fields over a defined frequency band. Search coils can be air-core loops for high-frequency or large-area applications, or high-permeability-core sensors for low-frequency sensitivity. The review literature describes many design variants: single-axis coils, tri-axial coils, gradiometers, tangential field coils, needle probes and magnetic antennas [19]. Recent search-coil work also focuses on core material and mechanical form factors, because sensitivity and bandwidth are strongly affected by apparent permeability, losses and core stability [8]. The search coil is inherently insensitive to DC magnetic field, which is a limitation for static field measurement but a benefit when low-frequency drift must be rejected.

A fourth architecture is the Rogowski coil, which measures current by sensing the time derivative of the magnetic flux surrounding a conductor. For a toroidal air-core winding around a conductor, the output voltage is proportional to dI/dt, and an integrator is used to recover I(t). Rogowski coils are especially valuable for large currents, fast transients and pulsed-power measurements because they are non-saturating and provide galvanic isolation. Self-integrating and differentiating designs have been analyzed for high-impulse current measurement, with attention to termination, bandwidth and waveform error [12; 13]. Although the measurand is current rather than magnetic field, the underlying sensor mechanism is Faraday induction.

A fifth architecture is the eddy-current probe coil. An alternating current in a probe coil induces currents in a nearby conductor; the induced currents alter the coil impedance and induced voltage. Dodd and Deeds provided analytical solutions for important axially symmetric eddy-current probe-coil configurations [2]. In this case the induced EMF is both the stimulus that drives eddy currents and the observable through which material properties, thickness or defects are inferred. The measurement

is therefore model-dependent: the measured voltage is not interpreted directly as magnetic flux but through electromagnetic boundary-value solutions. Table 1 summarizes the most common architectures and their measurement implications.

Table 1 - Common induced-EMF measurement configurations

Configuration	**Primary measurand**	**Main advantage**	**Main limitation**
Stationary pickup coil in AC field	dB/dt or EMF	Simple geometry and clear phase relation	Low-frequency sensitivity and lead pickup
Rotating coil in static field	Static B through motional EMF	Useful for DC field mapping	Mechanical speed, angle and vibration errors
Moving magnet through coil	Flux-change pulse	Large visible transient and intuitive polarity	Strong dependence on path, speed and magnet model
Search-coil magnetometer	AC magnetic field	High sensitivity over a designed band	No DC response and frequency-dependent calibration
Rogowski coil	dI/dt, then current by integration	Non-saturating isolated current measurement	Integrator drift and position sensitivity
Eddy-current probe coil	Material response through induced currents	Non-destructive testing of conductors	Model-dependent inverse interpretation

Coil geometry, sensitivity and loading

The induced voltage of a coil is proportional to flux linkage, so geometry is the first design variable. Increasing the number of turns increases sensitivity, but it also increases resistance, winding capacitance and inductance. Increasing area increases sensitivity to a uniform field, but it also increases pickup of unwanted environmental fields and spatial averaging. A ferromagnetic core increases apparent area and low-frequency sensitivity, but at the cost of nonlinearity, temperature dependence, Barkhausen noise, demagnetizing effects and finite permeability bandwidth. The designer therefore chooses coil parameters by balancing signal amplitude against bandwidth, noise and disturbance of the field being measured.

For air-core coils in a uniform field, the effective area can be calculated from the winding dimensions. For precision work, however, the area should be calibrated rather than inferred only from drawings. Multi-layer windings have turns at different radii; a simple use of the inner diameter can bias the sensitivity. Printed-circuit coils have accurately defined geometry but smaller area and fewer turns. Large loop antennas have high area but can be vulnerable to electrostatic pickup unless shielded. A shield can reduce capacitive coupling, but a conductive shield must be interrupted

to avoid forming a shorted turn that cancels the signal. Thus mechanical construction, electrostatic shielding and magnetic coupling cannot be separated.

Loading is another frequent source of error. The open-circuit EMF is an ideal quantity. A real voltmeter or amplifier has finite input resistance and capacitance. Connected to a coil with resistance R_c, inductance L_c and parasitic capacitance C_c, the input forms a frequency-dependent divider. At low frequency with high input impedance, the terminal voltage approximates the open-circuit EMF. Near self-resonance, the phase and amplitude can deviate strongly, and an apparent high sensitivity may be merely resonant amplification. For transient measurements, the same effect appears as ringing. The appropriate remedy is to design the coil and load so that the measurement band is far from resonance, or to calibrate the complete transfer function and deconvolve it carefully.

Thermal noise sets a lower bound on measurable EMF. The resistance of the winding produces Johnson noise with spectral density sqrt(4 k_B T R_c). Amplifier input voltage noise and current noise add to this; current noise flowing through the coil impedance may dominate for high-inductance coils at some frequencies. Environmental magnetic noise, mains harmonics and ground loops can exceed electronic noise by orders of magnitude. Twisted pair or coaxial lead routing reduces loop pickup, but the shield termination must be selected to avoid ground-loop currents. For microvolt-level induced voltages, the best coil design is often useless without magnetic shielding, differential input topology and careful cable geometry.

Figure 3 illustrates the phase relation for a sinusoidal magnetic field and an ideal pickup coil. The induced EMF is proportional to the negative time derivative of the field; therefore it leads or lags the field by a quarter period depending on polarity convention. Figure 4 gives an idealized frequency dependence for several turn counts and shows why induced-EMF sensors become more sensitive as frequency rises. The graph is intentionally ideal: it omits loading and resonance. Figure 5 later shows why this ideal trend cannot be extended indefinitely. The key design lesson is that sensitivity is not a single number unless the frequency band, load and calibration method are also specified.

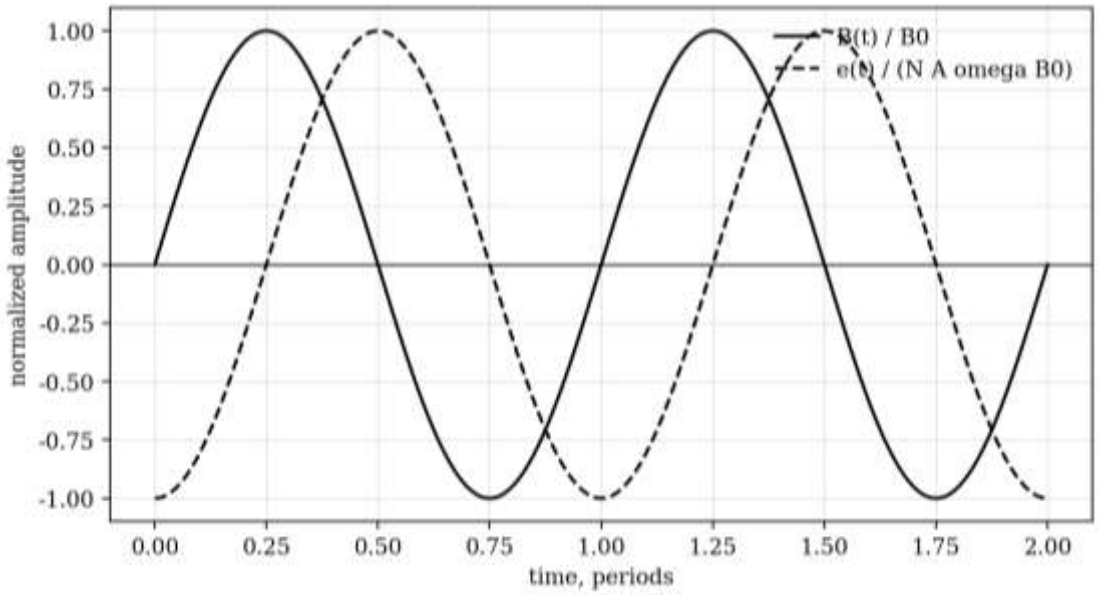


Figure 3 - Phase relation between sinusoidal magnetic field and induced EMF. (Author's development)

Signal conditioning and voltage acquisition

The front-end electronics must preserve the induced-EMF waveform without adding significant path-dependent pickup. A high-input-impedance differential amplifier is normally preferred when the coil output is small and the measurement frequency is below the region where cable transmission-line effects dominate. The differential input reduces common-mode noise, while the high impedance minimizes loading of the coil. For high-frequency or pulse measurements, controlled impedance termination may be more important than high impedance. In that case the coil, cable and oscilloscope are treated as a transmission system, and the measured voltage is interpreted using a calibrated load condition rather than as an open-circuit EMF.

Amplifier selection depends on bandwidth, input noise, input bias current, common-mode range and overload recovery. A search coil can produce very small signals during normal operation but large spikes during switching events. If the amplifier saturates, the recorded waveform may show delayed recovery or clipped peaks, causing large errors in integrated flux. AC coupling can remove offset and drift, but it also distorts low-frequency induction signals and makes absolute integration impossible below the high-pass corner. DC coupling is preferable for quantitative waveform integration, provided offset is characterized and removed with a defined baseline method.

Digitization must satisfy both amplitude and time requirements. The sampling frequency should be high enough to capture the highest significant spectral component of the induced EMF after anti-alias filtering. For a clean sinusoidal calibration, twenty samples per period may be sufficient for amplitude and phase estimation, but transient pulses require much higher oversampling because peak amplitude and time integral

are sensitive to waveform shape. The ADC resolution must be selected with expected EMF amplitude in mind; using a high-voltage range for millivolt signals wastes quantization resolution. Conversely, using a narrow range risks clipping during transients.

Signal processing should be documented as part of the measurement method. Common operations include baseline subtraction, windowing, Fourier amplitude extraction, numerical differentiation of reference current, numerical integration of EMF to recover flux, band-pass filtering and uncertainty propagation. Integration is attractive because Phi(t) = -1/N integral e(t) dt, but it amplifies low-frequency offset and drift. A small DC offset in voltage becomes a ramp in reconstructed flux. Practical algorithms use pre-event baseline intervals, high-pass filtering with a justified cutoff, or constrained integration in which the initial and final flux states are known. Each choice changes the measurand and must be stated.

Table 2 gives recommended acquisition decisions for common induced-EMF experiments. These recommendations are not universal rules; they express the logic of matching the electrical chain to the physics of the signal. A high-impedance oscilloscope input is suitable for a low-frequency open-circuit coil experiment, whereas a 50-ohm terminated path may be essential in a nanosecond pulse measurement. Similarly, a lock-in amplifier can provide excellent sensitivity for a single-frequency sinusoidal experiment but can be inappropriate for transient signals whose information content is broadband. The central principle is to avoid treating the display of a voltage waveform as the end of measurement. The waveform is only raw evidence from which the induced EMF is estimated after calibration and correction.

Table 2 - Signal acquisition choices for induced-EMF measurements

Measurement task	**Preferred front end**	**Processing emphasis**	**Critical risk**
Sinusoidal calibration	Differential high-impedance amplifier or lock-in input	Amplitude and phase extraction	Reference phase error and gain drift
Low-frequency search coil	Low-noise preamplifier near coil	Noise spectral density and transfer function	1/f noise and environmental magnetic interference
Fast pulse EMF	Terminated coaxial path or wideband differential probe	Peak, area and bandwidth correction	Ringing, clipping and aliasing
Flux reconstruction	DC-coupled chain with known offset	Baseline correction and numerical integration	Offset accumulation into false flux drift
Rogowski current measurement	Integrator or calibrated digital integration	Current waveform recovery	Droop, saturation of electronics and conductor position

Frequency-domain behavior and bandwidth

The frequency behavior of an induction sensor has two competing trends. Faraday's law gives an induced voltage proportional to angular frequency, so the desired signal increases as frequency rises. The coil and electronics, however, have a finite transfer function. At very low frequency the signal can be too small relative to voltage noise, amplifier offset, 1/f noise and environmental interference. At intermediate frequency the coil may exhibit a useful region where response is predictable and approximately proportional to frequency. At high frequency the winding inductance, capacitance, skin effect, core loss and load impedance produce amplitude and phase deviations. A calibrated bandwidth is therefore a defined interval over which the error remains within a stated tolerance.

Frequency-domain analysis is particularly important for search-coil magnetometers. In the ideal model V = omega N A_eff B, so the equivalent magnetic noise density is the voltage noise divided by omega N A_eff. This means magnetic noise improves with frequency until other terms dominate. A ferromagnetic core increases A_eff through apparent permeability, but the core response falls with frequency and can add magnetic noise. Space and geophysical instruments therefore use carefully selected core alloys, winding geometry and preamplifier placement to optimize the noise-equivalent magnetic field over the mission band. Reviews of magnetic sensors and induction coils emphasize that no sensor technology is universally superior; the operating frequency and required sensitivity determine the suitable instrument [16; 19].

The equivalent circuit in Figure 6 illustrates a common limitation. A coil can be modeled by a series resistance and inductance with a parasitic capacitance across the winding, connected to the input impedance of the amplifier or measuring instrument. This circuit is only approximate, but it explains why response may droop at low frequency under heavy loading and peak near resonance. If the experimenter calibrates the sensor at one frequency and then applies the calibration at a very different frequency, systematic error can dominate. For broadband measurements, calibration should produce amplitude and phase curves, not a single scale factor.

Phase is as important as magnitude. In an ideal coil the EMF is exactly ninety degrees out of phase with sinusoidal flux. Any additional phase shift from the amplifier, filters or coil resonance changes the reconstructed field. In applications such as power systems, plasma diagnostics and wave measurements, phase error affects derived quantities such as impedance, current timing, Poynting vector or energy dissipation. Digital correction can remove phase error if the transfer function is stable and known, but correction increases uncertainty near frequencies where the response has small magnitude or rapid phase variation.

Bandwidth also determines the meaning of peak EMF. A fast magnetic pulse can contain high-frequency components beyond the sensor bandwidth. The recorded pulse may then have a reduced peak, broadened shape and altered zero crossing, even

if the time integral is nearly preserved. This distinction matters when induced EMF is used to infer maximum dB/dt, because peak dB/dt is bandwidth-limited. It is less severe when the quantity of interest is total flux change, because integration can be robust to high-frequency attenuation if the sensor captures the overall area and baseline. Measurement reports should therefore state whether they estimate instantaneous EMF, peak EMF, rms EMF, spectral EMF or integrated flux change.

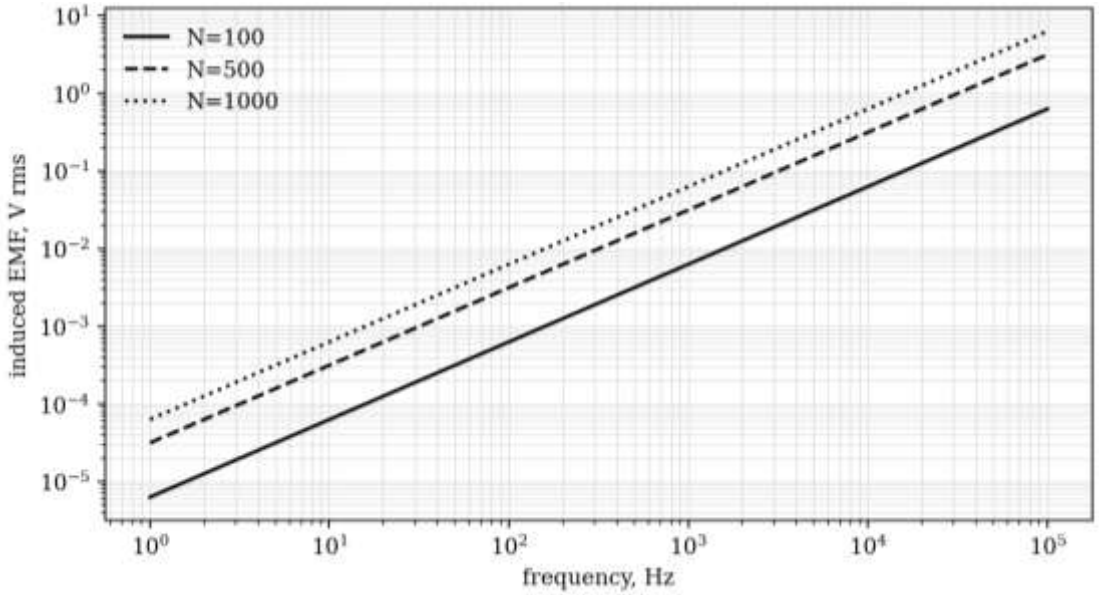


Figure 4 - Ideal induced EMF amplitude versus frequency for different turn counts. (Author's development)

Calibration and traceability

Calibration connects the recorded voltage to a known magnetic or electrical quantity. For induced-EMF measurements, calibration can be performed in at least four ways. The geometric method calculates sensitivity from coil turns and area, and from a known source field such as a Helmholtz pair. The electrical mutual-inductance method drives a primary coil with known current derivative and measures the secondary response. The comparison method places the sensor in the same field as a reference sensor whose calibration is already known. The system-transfer method injects a known voltage into the acquisition chain to determine amplifier and digitizer response separately from the coil. A strong protocol often combines these methods because each controls different error sources.

Traceability requires more than naming a reference instrument. It requires an unbroken chain of calibrations to recognized standards, with uncertainties propagated to the final result. For a Helmholtz calibration the traceable quantities include current amplitude, frequency, coil radius, turn count, alignment, temperature and voltage-gain calibration. If the reference field is derived from current, the current shunt or transducer must itself be calibrated. If the pickup coil area is measured mechanically, the

dimensional instruments require calibration. If the measurement uses a lock-in amplifier, its voltage scale and phase reference require verification. This language follows the general philosophy of the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement and related NIST guidance [7; 18].

A sinusoidal calibration is often the most convenient. The source field is B(t) = B_rms sqrt(2) sin(omega t), and the ideal induced voltage is V_rms = omega N A_eff B_rms. Measuring V_rms over frequency gives a sensitivity curve K(f) = V_rms/B_rms. If the field amplitude is kept constant, a log-log plot of V_rms versus frequency should have a slope of one in the ideal region. Deviations reveal loading, amplifier roll-off, core behavior or unexpected source-field changes. The phase relative to the reference current should also be recorded because magnitude alone cannot support time-domain reconstruction.

Transient calibration can be more difficult but is sometimes necessary. A step in current through a primary winding gives a pulse of induced EMF whose integral equals the change in flux linkage. This is useful for calibrating integrators and for verifying that the recorded EMF area matches known flux change. However, current steps are not ideal; they have finite rise time, overshoot, ringing and electromagnetic interference. The reference current waveform must therefore be measured with adequate bandwidth. Otherwise the comparison becomes a test of the current probe and switching circuit rather than the induction sensor.

Calibration intervals should be determined by stability. An air-core coil with fixed geometry may be very stable mechanically, but its effective area can still change if leads move, if the shield is altered or if the input impedance changes. A core coil can drift with temperature, magnetization history or mechanical stress. A Rogowski coil may be stable in turn geometry but sensitive to integrator time constant and termination. The most reliable practice is to calibrate the assembled sensor, cable, amplifier and acquisition channel as a system whenever practical, then use separate electrical checks to identify which component has changed if the system response drifts.

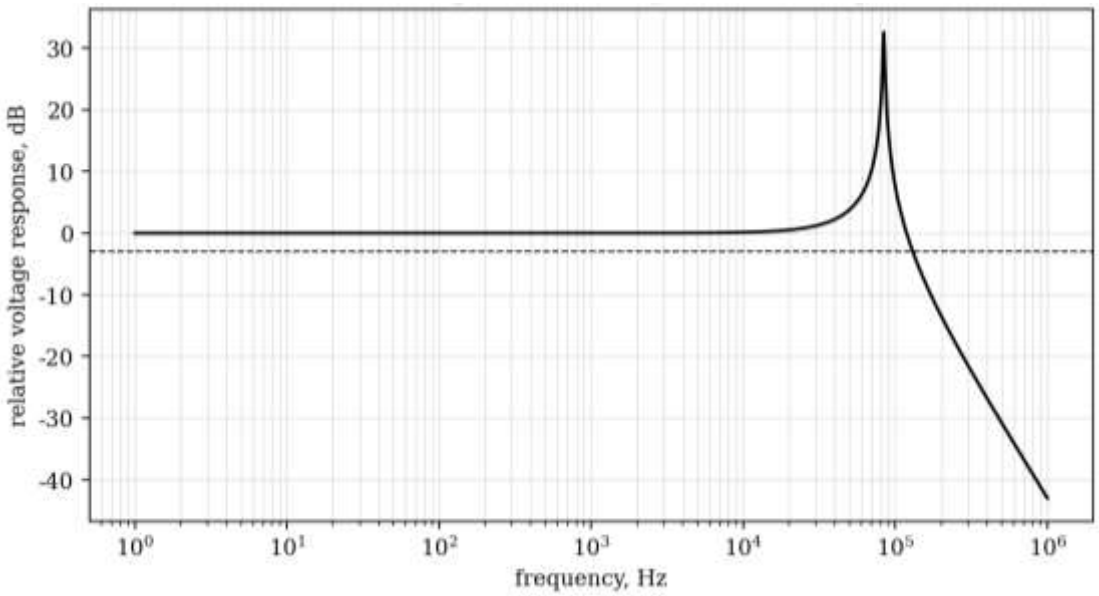


Figure 5 - Illustrative frequency response of a loaded pickup coil. (Author's development)

Reference experiment for induced-EMF measurement

A reproducible laboratory experiment can be built around a pair of Helmholtz coils generating a sinusoidal magnetic field and a small pickup coil at the center. The objective is to measure the induced EMF and compare it with the value predicted from the known current derivative and coil geometry. The source current is measured with a calibrated shunt or current probe. The pickup voltage is recorded with a differential input. The pickup coil axis is aligned with the Helmholtz field. The lead loop area is minimized by twisting the pair from the pickup coil to the amplifier and by placing the leads so that they do not enclose significant source flux. The experimental arrangement is simple, but it contains the essential elements of a precision induced-EMF measurement.

The measurement sequence should begin with zero-field checks. With the source amplifier off, the voltage noise spectrum is recorded to identify mains interference, radio-frequency pickup, amplifier noise and offset. Next, the source is driven with current but the pickup coil is rotated by ninety degrees so that its normal is perpendicular to the field. The residual voltage in this position estimates lead pickup, electrostatic coupling and imperfect alignment. The coil is then returned to the aligned position and measurements are made over a frequency sweep. At each frequency the current amplitude, pickup voltage amplitude, phase and environmental conditions are logged.

Data analysis compares measured sensitivity with K_ideal(f) = 2 pi f N_s A_s B_rms/I_rms times the source field per ampere. If the Helmholtz geometry is used directly, B_rms/I_rms = (mu_0 N_H/R_H)(4/5)^(3/2). The measured transfer K_meas(f) = V_rms/I_rms should be linear in f over the ideal band. A least-squares fit of V_rms versus f I_rms yields the effective N_s A_s multiplied by the source-field

constant. The residuals of this fit are a sensitive diagnostic: curvature at high frequency suggests transfer-function error; excess scatter at low frequency suggests noise; a nonzero intercept suggests pickup not proportional to dB/dt.

For a moving-magnet variant, the experimenter records the bipolar EMF pulse as the magnet passes through the pickup coil. Figure 6 shows a simplified model in which the flux linkage is approximated by a Gaussian function of time or position; the induced EMF is the negative derivative and therefore has opposite-polarity lobes. The integral of the complete voltage pulse should be zero if the magnet begins and ends far from the coil and the net flux returns to the same value. If only one lobe is captured, or if baseline correction is poor, the integral will falsely imply a nonzero final flux. This demonstration is valuable because it reveals why integration requires baseline discipline and adequate time window length.

The experiment should report not only agreement with Faraday's law but the conditions under which the agreement holds. A common weak conclusion is to state that the measured EMF is proportional to frequency. A stronger conclusion states the fitted effective area, the uncertainty, the frequency interval over which the residuals are within tolerance, the observed phase error, the noise floor and the corrections applied for loading or lead pickup. In this form the experiment becomes a metrological realization of Faraday's law rather than a qualitative demonstration.

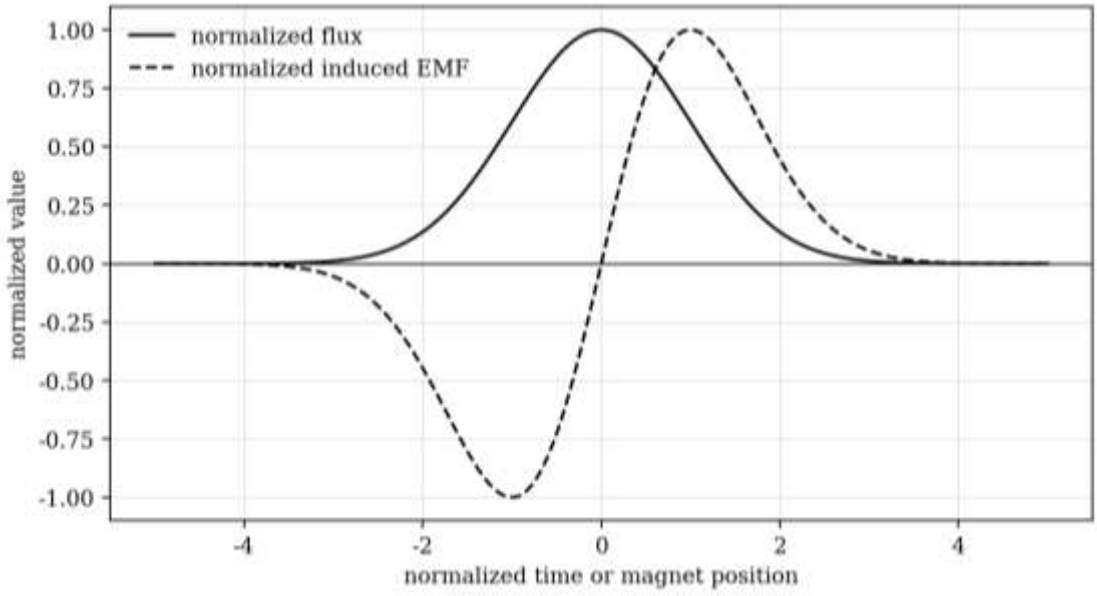


Figure 6 - Modeled flux and induced EMF pulse for a moving magnet. (Author's development)

Uncertainty model

Uncertainty analysis converts the measurement from a plausible observation into a scientific result. The output quantity may be induced EMF, coil sensitivity, magnetic flux density or reconstructed flux. For an ideal sinusoidal pickup measurement estimating B_rms from measured V_rms, the model is B_rms =

V_rms/(omega N A_eff G), where G is the calibrated gain of the acquisition chain including coil-loading correction if needed. The relative standard uncertainty combines contributions from voltage amplitude, frequency, turn count, effective area, gain, alignment, waveform purity and repeatability. If the source-field method is used, additional terms enter from Helmholtz geometry and current measurement.

Frequency uncertainty is usually negligible when a stable function generator or digitizer clock is used, but it can matter for rotating-coil measurements where mechanical speed fluctuates. Turn count uncertainty is normally zero for a manufactured coil if the winding is verified, but it can be nonzero in handmade educational coils. Effective area is often the dominant geometric uncertainty because it depends on winding dimensions and field uniformity. Alignment contributes through the cosine factor: B_n = B cos(theta). For small misalignment theta in radians, the error is approximately theta^2/2, so one-degree misalignment gives a small but not always negligible term. In gradient fields, positioning uncertainty can be more important than angular error.

Voltage measurement uncertainty includes instrument calibration, resolution, noise, bandwidth, input impedance and waveform processing. For rms sinusoidal measurements, a lock-in amplifier can reduce random noise by narrowband detection, but it introduces reference phase and time-constant considerations. For oscilloscope measurements, vertical scale accuracy, sample jitter, anti-alias filtering and record length matter. For peak pulse measurements, bandwidth and sampling can dominate. For integrated flux, baseline offset and low-frequency drift often dominate, even when the voltage peak is accurately captured.

Type A uncertainty is evaluated statistically from repeated observations. Repeating a frequency point many times quantifies noise and short-term drift. Type B uncertainty is evaluated from calibration certificates, instrument specifications, geometric tolerances or prior information. The combined standard uncertainty is the root-sum-square of sensitivity-weighted standard components when correlations are negligible. Expanded uncertainty is obtained by multiplying the combined standard uncertainty by a coverage factor, often k = 2 for approximately 95 percent coverage when conditions are appropriate [7; 18]. Correlations should not be ignored if the same current calibration, geometry measurement or voltage gain applies to multiple data points in a fitted curve.

Table 3 presents an illustrative uncertainty budget for a sinusoidal Helmholtz-coil measurement of induced EMF. The numbers are not universal; they show the structure of the calculation. In many real experiments the dominant terms are not the ones expected from the ideal equation. A laboratory may spend effort measuring coil diameter to 0.1 percent while ignoring lead pickup that contributes 2 percent at low frequency. Conversely, in a well-shielded calibration setup, geometry and gain calibration can dominate. The uncertainty model should be revised after residual analysis, not copied mechanically from an instrument manual.

Table 3 – Illustrative uncertainty budget for sinusoidal induced-EMF measurement

Input quantity	Typical standard uncertainty	Sensitivity in model	Comment
Voltage amplitude V_rms	0.30 %	Direct	Includes instrument calibration, noise and fit uncertainty
Frequency f	0.01 %	Direct	Usually small for a clocked source
Effective coil area A_eff	0.50 %	Inverse for B estimate	Often includes winding geometry and field averaging
Acquisition gain G	0.20 %	Inverse for B estimate	Should include amplifier and digitizer scale
Alignment angle theta	0.10 %	Cosine correction	One-degree class alignment in uniform field
Coil loading correction H_c	0.30 %	Inverse correction	Frequency dependent; verify away from resonance
Repeatability	0.25 %	Direct	Estimated from repeated runs under the same settings

Data processing and reconstruction of magnetic flux

The induced voltage is often an intermediate quantity. Many applications require magnetic flux, magnetic field or current reconstructed from EMF. For a pickup coil, Phi(t) = Phi(t0) - (1/N) integral_t0^t e(tau) d tau. For a Rogowski coil, current is similarly recovered by integrating the coil output after applying the coil constant. Numerical integration is straightforward in principle but delicate in practice. Any DC offset, low-frequency drift or thermoelectric voltage accumulates with time. Therefore integration must be constrained by physical boundary conditions or accompanied by offset estimation.

A common method for pulse data is pre-trigger baseline subtraction. The average voltage over a quiet interval before the event is subtracted from the whole record, then the corrected signal is integrated. This is valid if the offset is constant during the record. If the offset drifts, a polynomial or low-order baseline fitted to pre-event and post-event intervals may be better, but such fitting can remove real low-frequency signal. The analyst should avoid choosing a baseline simply because it makes the final integral look expected. Instead, the baseline model should be selected before viewing the final result, or justified by independent zero-signal measurements.

Frequency-domain integration is another option. In the Fourier domain, integration corresponds to division by j omega. This strongly amplifies low-frequency noise, so a regularized inverse filter or band-limited integration is usually required. The result is then a flux waveform valid only within the passband. This is acceptable when the physical signal has no important content outside that band, but it is misleading if

slow flux drift or DC change is relevant. A report that presents reconstructed B(t) should state the integration filter, passband, phase convention and endpoint constraints.

Differentiation appears in the reference side of many experiments. If source current is measured and the predicted EMF is computed as proportional to dI/dt, numerical differentiation of noisy current data can introduce large high-frequency noise. It is usually better to fit a sinusoidal model to the current and differentiate the fitted function, or to use a calibrated current waveform generated with known frequency and amplitude. For transient current, smoothing or model-based differentiation should be matched to the bandwidth of the EMF measurement. Otherwise the comparison between predicted and measured voltage will be dominated by processing artifacts.

Phase-sensitive processing is necessary when induced EMF is measured in sinusoidal steady state. A lock-in amplifier gives in-phase and quadrature components relative to a reference. If the reference is source current, ideal induced EMF is in quadrature with current when the source field is proportional to current. Phase errors reveal coil loading, source-field phase lag, amplifier delay or reference-channel delay. A vector treatment of amplitude and phase is more informative than comparing only rms magnitudes. For broadband data, transfer-function estimation by cross-spectrum methods can separate coherent induced response from incoherent noise, improving sensitivity and uncertainty estimates.

Comparative assessment of measurement approaches

The stationary pickup-coil method is the best starting point for controlled laboratory verification because the geometry is visible, the frequency is known and the expected waveform is simple. Its weakness is sensitivity at low frequency. A small coil in a weak slowly varying field produces microvolts or less, so the experiment can become dominated by environmental noise. Increasing turns or core permeability improves sensitivity but changes the bandwidth and introduces additional uncertainties. For educational work the method is robust; for precision field measurement it requires careful calibration and shielding.

The moving-coil or rotating-coil method is well suited to static field measurement. Because EMF is generated by motion through a steady field, the method can map DC magnets that a stationary search coil cannot measure. The disadvantages are mechanical: angular position, speed stability, vibration, coil deformation and mechanical alignment enter the measurement equation. Rotating coils are powerful where precision mechanics is available, but they are less attractive for compact or harsh environments.

The moving-magnet method is visually persuasive and generates large pulses, but it is usually the least precise unless the magnet field and motion are controlled. The flux waveform depends on magnet geometry, path, speed, coil dimensions and magnetic materials nearby. It is excellent for demonstrating Lenz's law, polarity and pulse integration; it is poor as a primary calibration unless combined with position

tracking and field modeling. The method can, however, be valuable for validating transient acquisition and baseline correction because the pulse area has clear physical constraints.

Search-coil magnetometers are the preferred architecture for measuring weak AC magnetic fields over defined bands. They can be built with high sensitivity and low noise, and they scale well into tri-axial instruments. Their main limitation is the absence of DC response and the need for frequency-dependent calibration. Fluxgate, Hall, magnetoresistive or SQUID sensors may be superior for DC or very low-frequency fields, while search coils are often superior for AC fields where dB/dt is appreciable [16]. Hybrid instruments attempt to combine complementary mechanisms so that a single device covers a wider band [14].

Rogowski coils are the most appropriate choice when the physical quantity of interest is current in a conductor rather than ambient magnetic field. They are safe, isolated and non-saturating for large currents. Their output requires integration, and their sensitivity to conductor position and external fields depends on winding uniformity and shielding. Eddy-current probe coils are different again: they are inverse-problem instruments whose voltage response depends on conductor geometry, conductivity, permeability and defects. The induced EMF is not the final measurand but part of an electromagnetic material-interaction model [2].

Applications in scientific and engineering instrumentation

Induced-EMF measurement is a foundation of electric-machine diagnostics. Search coils embedded in or near motors and generators monitor slot harmonics, rotor faults, air-gap flux, vibration-induced modulation and insulation-related anomalies. The induced voltage carries information about time-varying magnetic flux that may not be visible in terminal current alone. Because machines are electromagnetically noisy and mechanically complex, the measurement must control lead routing, common-mode voltage, grounding and bandwidth. A poorly placed loop of measurement cable can pick up switching fields from the drive inverter and be mistaken for internal machine flux.

Power and pulsed-power systems use induction sensors for current measurement and protection. Rogowski coils can measure large alternating or impulse currents without magnetic saturation, and their non-intrusive nature is useful where inserting a shunt would alter the circuit or create insulation problems [12; 13]. The price is the need for integration and calibration over a wide dynamic range. In protection relays and power electronics, a few degrees of phase error or a small droop in the integrator can affect fault detection and energy estimation. Thus the same Faraday-law principle supports both laboratory physics and industrial safety-critical measurement.

Geophysical and space measurements use search coils to detect natural and artificial electromagnetic waves. A time-varying magnetic field from ionospheric, magnetospheric or subsurface sources induces voltages in coils whose axes define

vector components. The frequency band, noise-equivalent magnetic field and thermal stability determine the scientific value of the data. Recent sensor development continues to refine core structures, low-noise electronics and hybrid concepts for compact platforms [8; 14]. The challenge is not proving Faraday's law; it is realizing a stable and calibrated instrument in a variable environment.

Non-destructive testing uses eddy-current probes to inspect conductive materials. The probe's alternating magnetic field induces currents in the material; cracks, thickness changes and conductivity variations alter the reflected field and probe impedance. The signal interpretation depends on models such as those developed for axially symmetric probe-coil problems [2]. In this application, induced EMF measurement becomes a method of material characterization. Calibration blocks with known defects or thicknesses are required because the inverse relation between voltage and defect geometry is not unique without constraints.

Education remains an important application because Faraday's law connects abstract vector calculus with observable voltage waveforms. However, educational experiments should not teach imprecise habits. Students should mark coil polarity, define the positive normal, record the lead arrangement, compare phase as well as amplitude and discuss why a voltmeter reading in a time-varying magnetic field is path-dependent. This approach prepares students for real instrumentation problems and avoids the misleading idea that Faraday's law is only a proportionality between magnet speed and voltage magnitude.

Conclusion

Faraday's law of induction provides the theoretical basis for measuring induced electromotive force, but a valid measurement requires more than placing a voltmeter across a coil. Induced EMF is a contour quantity associated with changing magnetic flux or motion in a magnetic field. Its sign depends on orientation conventions, and its measured value can depend on lead geometry and instrument loading. The law must therefore be implemented through a defined measurement equation, a controlled electromagnetic path and a calibrated acquisition chain.

The review has shown that stationary pickup coils, moving coils, moving magnets, search-coil magnetometers, Rogowski coils and eddy-current probes all realize Faraday induction in different ways. Their strengths and limitations differ because they measure different aspects of field change, motion, current derivative or material response. Coil geometry determines basic sensitivity, while resistance, inductance, capacitance, load impedance, amplifier noise and digitizer bandwidth determine the useful measurement range. Calibration over frequency and phase is essential when the signal is not a single low-frequency sinusoid.

A rigorous induced-EMF experiment should report coil parameters, polarity, alignment, lead routing, input impedance, source-field calibration, acquisition settings, signal processing, transfer function and uncertainty. The uncertainty budget should include voltage measurement, frequency, geometry, gain, alignment, noise, loading

and environmental pickup. When these elements are controlled, measurements of induced EMF can provide precise access to magnetic flux variation, AC magnetic fields, current pulses and electromagnetic material interactions. Faraday's law remains experimentally simple in concept, but its modern measurement is a demanding and rich problem in electromagnetic metrology.

References:

1. Bossavit A. What do voltmeters measure? // COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. - 2008. - Vol. 27, № 1. - P. 9-16. - DOI: 10.1108/03321640810836582.
2. Dodd C.V., Deeds W.E. Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems // Journal of Applied Physics. - 1968. - Vol. 39, № 6. - P. 2829-2838. - DOI: 10.1063/1.1656680.
3. Faraday M. Experimental researches in electricity // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. - 1832. - Vol. 122. - P. 125-162. - DOI: 10.1098/rstl.1832.0006.
4. Faraday M. Experimental researches in electricity. Seventh Series // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. - 1834. - Vol. 124. - P. 77-122. - DOI: 10.1098/rstl.1834.0008.
5. Griffiths D.J. Introduction to Electrodynamics. - 4th ed. - Harlow: Pearson, 2013. - 624 p.
6. Jackson J.D. Classical Electrodynamics. - 3rd ed. - New York: Wiley, 1998. - 832 p.
7. JCGM. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008. - Sevres: Joint Committee for Guides in Metrology, 2008. - 120 p. - DOI: 10.59161/JCGM100-2008E.
8. Kang H., Jin H., Jang Y., Lee S., Park H., Kim J., Jo W. Performance test of search coil sensors with different core types // Journal of Astronomy and Space Sciences. - 2024. - Vol. 41, № 3. - P. 139-148. - DOI: 10.5140/JASS.2024.41.3.139.
9. Kinsler P. Faraday's Law and Magnetic Induction: Cause and Effect, Experiment and Theory // Physics. - 2020. - Vol. 2, № 2. - P. 150-163. - DOI: 10.3390/physics2020009.
10. Lenz E. Ueber die Bestimmung der Richtung der durch elektrodynamische Vertheilung erregten galvanischen Strome // Annalen der Physik und Chemie. - 1834. - Bd. 107. - S. 483-494. - DOI: 10.1002/andp.18341073103.
11. Maxwell J.C. A dynamical theory of the electromagnetic field // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. - 1865. - Vol. 155. - P. 459-512. - DOI: 10.1098/rstl.1865.0008.
12. Metwally I.A. Self-integrating Rogowski coil for high-impulse current measurement // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. - 2010. - Vol. 59, № 2. - P. 353-360. - DOI: 10.1109/TIM.2009.2023821.
13. Metwally I.A. Design of different self-integrating and differentiating Rogowski coils for measuring large-magnitude fast impulse currents // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. - 2013. - Vol. 62, № 8. - P. 2303-2313. - DOI: 10.1109/TIM.2013.2255994.
14. Miles D.M., Narod B.B., Milling D.K., Mann I.R., Barona D., Hospodarsky G.B. A hybrid fluxgate and search coil magnetometer concept using a racetrack core // Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems. - 2018. - Vol. 7. - P. 265-276. - DOI: 10.5194/gi-7-265-2018.
15. Neumann F.E. Die mathematischen Gesetze der inducirten elektrischen Strome: vorgelesen in der Berliner Akademie der Wissenschaften am 27. October 1845. - Berlin: G. Reimer, 1846. - 87 S. - DOI: 10.3931/e-rara-135641.

16. Ripka P., Janosek M. Advances in magnetic field sensors // IEEE Sensors Journal. - 2010. - Vol. 10, № 6. - P. 1108-1116. - DOI: 10.1109/JSEN.2010.2043429.

17. Rodriguez E.E. Hands-on experiments on Faraday's law // The Physics Teacher. - 2005. - Vol. 43, № 4. - P. 228-230. - DOI: 10.1119/1.1888083.

18. Taylor B.N., Kuyatt C.E. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. NIST Technical Note 1297. - Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1994. - 24 p. - DOI: 10.6028/NIST.tn.1297.

19. Tumanski S. Induction coil sensors - a review // Measurement Science and Technology. - 2007. - Vol. 18, № 3. - P. R31-R46. - DOI: 10.1088/0957-0233/18/3/R01.

УДК 622.68:62-83

Андреева Н. Н., Голованов Е. В.
Филиал Мурманского арктического университета в г. Апатиты, Апатиты, Россия

ЭВОЛЮЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ШАХТНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

Аннотация: в статье рассматриваются современные тенденции развития подземного рудничного транспорта на основе шахтных автосамосвалов (ШАС). Проанализированы основные недостатки машин с двигателями внутреннего сгорания (ШАС-Д), проявляющиеся при увеличении глубины горных работ и интенсивности транспортировки: рост затрат на проветривание, тепловое загрязнение выработок, снижение качества рудничной атмосферы. В качестве альтернативы предложено использование ШАС с электрическим приводом (ШАС-Э) в различных компоновках (батарейные, троллейные, комбинированные). Приведены результаты сравнительного анализа эксплуатационных характеристик, показатели энергоэффективности, надёжности и производительности.

Ключевые слова: шахтный автосамосвал, электрический привод, двигатель внутреннего сгорания, проветривание горных выработок, батарейное питание.

Шахтные автосамосвалы (ШАС) являются ключевым звеном в структуре производственных процессов современных горных предприятий, эксплуатирующих комплексы самоходных горных машин. Без преувеличения можно сказать, что за последние 30 лет ШАС эволюционировали от машин грузоподъёмностью 10-30 тонн, с относительно невысокой технической надежностью, до оснащенных передовой электроникой и готовых к автономной работе, обладающих высокой степенью надёжности, безопасности и комфорта для машиниста, а самое главное грузоподъёмностью – до 65 т. По мере увеличения глубины разработки месторождений ПИ, связанного с объективными факторами горного производства, применение все более производительных ШАС с высокой грузоподъёмностью и мощностью ДВС привело к значительному удорожанию проветривания горных работ, а также потребовало проходку дополнительных вентиляционных выработок (большого сечения) для обеспечения, растущих потребностей горных предприятий в объёмах подаваемого воздуха. Дальнейшее развитие ШАС на базе ДВС (далее ШАС-Д) ограничено ростом мощности привода ШАС, а также значительным увеличением затрат на проветривание и техническое обслуживание ШАС. Что обусловлено тяжелыми условиями эксплуатации данных машин, связанного с ростом транспортного плеча и повышенной нагрузки на привод, в связи с увеличением времени работы привода, в режиме максимальной нагрузки при движении в груженном состоянии под уклон.

Перечислим основные недостатки при эксплуатации ШАС-Д на подземных рудниках: [2-8]

- рост эксплуатационных затрат на проветривание при увеличении кол-ва одновременно эксплуатируемых ШАС-Д;
- необходимость строительства дополнительных вентиляционных выработок (в т.ч. увеличивать их проектное сечение с целью удовлетворения требованиям о допустимой скорости воздуха), что приводит к росту затрат на ГКР и увеличению сроков ввода новых производственных мощностей (горизонтов) в эксплуатацию (см. табл. 2);
- периодический локальный нагрев горных выработок, в особенности уклонов, при движении по которым в груженном состоянии, ШАС-Д выделяет значительное кол-во тепловой энергии (см. рис.1) (при продолжительном воздействии циклов перепадов температур может привести к снижению устойчивости подобных горных выработок) [2, 3];
- повышения запыленности горных выработок в местах работы ШАС-Д;
- общее снижение качественного состава рудничной атмосферы, из-за растущего числа одновременно работающих ШАС-Д;
- рост шумового загрязнения, ухудшение санитарных условий труда;
- увеличение эксплуатационных затрат на текущие и предупредительные ремонты ШАС с ДВС (смотреть таблицу 1).

А)

Б)

Рисунок 1 – Распределение тепловой мощности и рабочей нагрузки ШАС оснащенного ДВС и электрическим приводом

Одним из решений, перечисленных выше проблем, стало создание ШАС-Э с электрических приводом в следующих вариациях:

- с питанием от автономного источника питания (батареи) и зарядкой с помощью зарядной станции на борту (в т.ч. в вариантах очень быстрой зарядкой - за 10-15 минут до 90% от емкости батареи);
- с питанием от автономного источника энергии (батареи, батарейные ШАС-Э) и заменой батарей;
- с питанием от электрической линии (троллея);
- с питанием от автономного источника энергии и зарядкой от электрической линии (троллея) в процессе движения (перспективный вариант).

ШАС-Э нельзя назвать передовой разработкой, с точки зрения его конструкции и принципа действия. Например, ШАС-Э с питанием от троллея применяются на открытых горных работах с конца 1970-ых годов, а на подземных с конца 1990-ых. Однако последние разработки в области прикладной химии позволили создать принципиально новые автономные источники питания привода ШАС-Э, обеспечивающие целый ряд преимуществ для батарейных ШАС-Э над троллейными. По сравнению с троллейными ШАС, ШАС с автономными источниками питания обладают в значительной степени большей мобильностью, а также не оборудованы вспомогательным (маневровым) ДВС двигателем, что позволяет повысить их техническую готовность и полностью отказаться от затрат на проветривание по фактору работы ДВС.

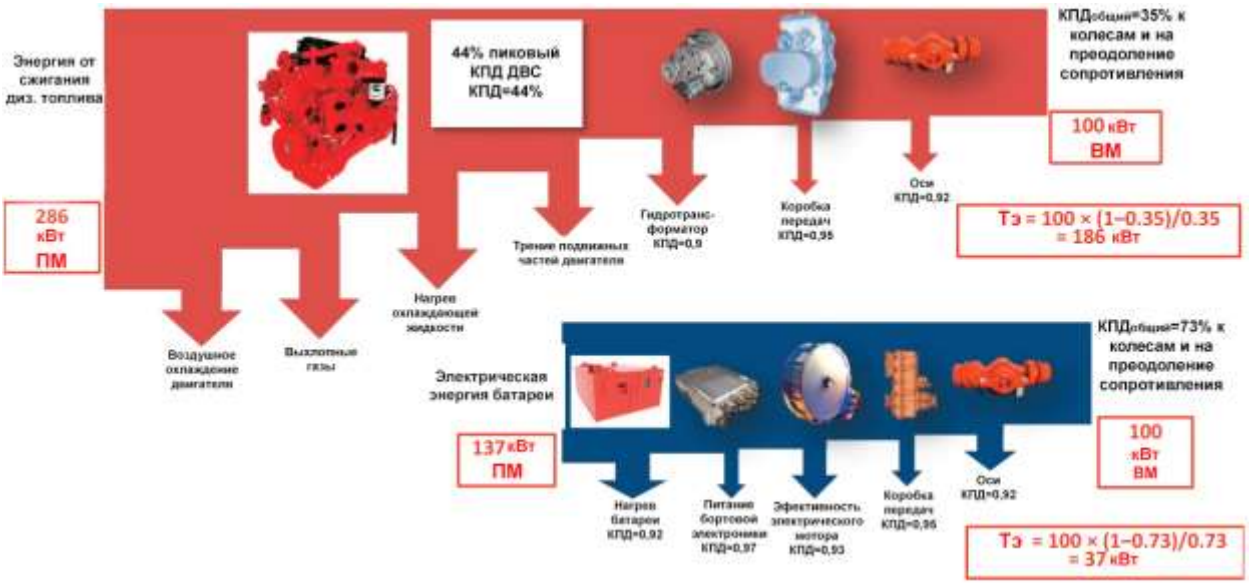


Рисунок 2 – Сравнение эффективности работы основных узлов ШАС-Э и ШАС-Д

Накопленный опыт применения батарейных ШАС-Э показывает достаточно высокие производственные результаты: (смотреть таблицу 2) [3-8, 12-14]

- ШАС-Э обладают более высоким ускорением при начале движения чем ШАС-Д, за счёт отсутствия трансмиссии у батарейных ШАС-Э, что ведет к сокращению времени транспортного цикла в среднем на 10-15%;
- так как на ШАС-Э не накладываются ограничения, связанные с увеличением мощности привода ДВС, электродвигатели ШАС-Э обладают совокупной мощностью в среднем на 25-35% больше чем у ШАС-Д;
- более плавное движение ШАС-Э за счёт отсутствия необходимости переключения передач (см. рис. 2);
- сокращение эксплуатационных и временных затрат на ТОиР (в среднем на 20-30%) в сравнении для ШАС-Э в связи с отсутствием целого ряда сложных технических узлов, обладающих значительным количеством движущихся частей и механизмов (см. рис. 2);
- сокращение затрат на ГСМ (энергию) до 70-80%;
- за счёт большей мощности электродвигателей, а также условий их работы, ШАС-Э в гружённом состоянии на уклонах до 10º показывает на 20-30% большую производительность чем у ШАС-Д, при этом потребляя меньше энергии на транспортировку полезной нагрузки (см. рис. 1);
- за счёт конструктивных особенностей ШАС-Э обладают высокой степенью технической надёжности (коэффициент технической готовности в районе 85-90% (см. табл. 2));
- ШАС-Э обеспечивают значительное сокращение вредных выбросов (в т.ч. шума) и тепловой энергии в рудничную атмосферу, что повышает общую безопасность горных работ (см. рис. 1);

- опыт применения ШАС-Э позволяет достичь снижения эксплуатационных затрат на проветривание горных работ в среднем на 20-30%;
- применение систем с быстрой зарядкой позволяет заряжать батареи за 10-20 минут, а применение систем быстрой замены батареи, позволяет машинисту производить замену батареи, не выходя из машины (в среднем за 5-6 минут), что обеспечивает высокую степень внутрисменного использования батарейных ШАС;
- возможность рекуперации энергии при торможении двигателем, например при движении вниз по уклону, обеспечивает снижение эксплуатационных затрат на транспортировку горной массы;
- более высокая производительность и техническая надёжность ШАС-Э позволяет сократить штатное кол-во ШАС и обслуживающего персонала.

Перечислим существующие недостатки ШАС-Э:

- на данный момент только ШАС-Э производства Sandvik обладают функцией быстрой смены батареи («AutoSwap»), что позволяет машинисту заменять батарею, не выходя из кабины и дает возможность размещать зарядные станции в абсолютно любых незанятых выработках. В остальных случаях требуется строительство зарядных камер объёмом до 900-1000 м^3, что требует увеличения объёмов ГКР, а также сроков ввода новых горизонтов в строй;
- если применяется способ зарядки, связанный со сменой батарей, это требует иметь в наличии две батареи - одну в работе и одну в резерве, что в конечном итоге ведет к увеличению капитальных затрат на приобретение комплектов ШАС-Э за счёт необходимости покупки батарей и оборудования для зарядной инфраструктуры и эксплуатационных на их обслуживание;
- бортовая система управления современных батарейных ШАС-Э представляет собой передовой электронный комплекс, обеспечивающий контроль за состоянием батареи и распределение нагрузки на привод во время движения. Несмотря на свою высокую надёжность данная система требует привлечение в штат инженера-электронщика для её технического обслуживания;
- современные батареи третьего поколения (смотреть рисунок 3) обладают высокой надёжностью и долговечностью, однако в случае выгорания ячеек для их замены требуется профильный специалист (аккумуляторщик), который может оперативно произвести замену неисправного элемента батареи (ячейки), что потребует дополнительных затрат на отчисления в ФОТ;

- недостаточный опыт эксплуатации батарей не даёт возможность оценить степень безопасности (безаварийности) их эксплуатации в особенности в случае пожаров или падения заколов.

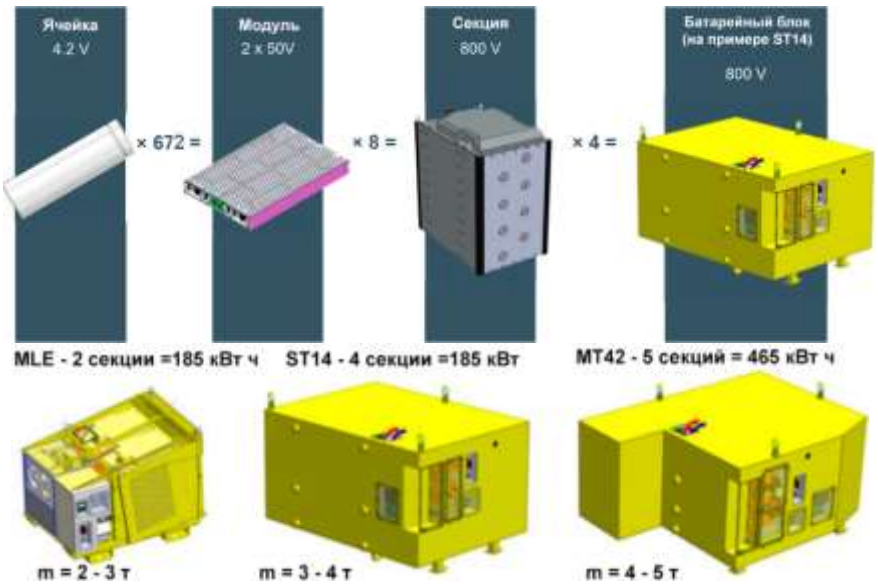


Рисунок 3 – Пример устройства автономных источников питания производства Epiroc [9]

Таким образом, переход от шахтных автосамосвалов с двигателями внутреннего сгорания к электрифицированным машинам, особенно с батарейным питанием, является объективной необходимостью при отработке глубоких горизонтов и возрастании интенсивности горных работ. Накопленный опыт демонстрирует снижение эксплуатационных затрат на проветривание, ТОиР и энергоносители в зависимости от конкретных условий, а также повышение производительности и безопасности труда.

Список литературы:

1. Бондаренко А.А., Шарипов Р.Х. Опыт и сравнительный анализ эффективности эксплуатации дизельных и электрических погрузочно-доставочных машин // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2021. – №4. –С. 246-257. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-246-257 EDN: LXYRZL

2. Sandvik outlines its emission-free mining journey at The Electric Mine 2022 // International Mining. – 28 Feb. 2022. – Режим доступа: https://im-mining.com/2022/02/28/sandvik-outlines-its-emission-free-mining-journey-at-the-electric-mine-2022/ (дата обращения: 10. 04 .2026).

3. Sandvik to supply underground BEV fleet to Hindustan Zinc, one of the world's largest integrated producers of zinc // PR Newswire. – Режим доступа: https://www.prnewswire.com/news-releases/sandvik-to-supply-underground-bev-fleet-to-hindustan-zinc-one-of-the-worlds-largest-integrated-producers-of-zinc-301537571.html/ (дата обращения: 10. 04 .2026).

4. Vale PowerShift mining program: electric is the way forward on surface & underground // International Mining. – 3 Oct. 2019. – Режим доступа:https://im-mining.com/2019/10/03/vale-powershift-mining-program-electric-way-forward-surface-underground/ / (дата обращения: 10.04.2026).

5. Paraszczak, J., Svedlund, E., Fytas, K., Laflamme, M. Electrification of Loaders and Trucks – A Step Towards More Sustainable Underground Mining // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (RE&PQJ). – Vol. 12, No. 1, 2014. – Режим доступа: https://doi.org/10.24084/repqj12.240 / (дата обращения: 10. 04 .2026).

6. Vale is the first mining company to test 100% electric 72-ton trucks. Режим доступа: https://www.vale.com/w/vale-is-the-first-mining-company-to-test-100-electric-72-ton-trucks / (дата обращения: 10. 04. 2026).

7. Vale, Epiroc planning for automation shift with battery-electric loaders at Creighton. – Режим доступа: https://im-mining.com/2023/03/17/vale-epiroc-planning-for-automation-shift-with-battery-electric-loaders-at-creighton/ (дата обращения: 10. 04. 2026).

8. Boliden to deploy Volvo Trucks electric models underground at Kankberg. – Режим доступа: Boliden to deploy Volvo Trucks electric models underground at Kankberg https://im-mining.com/2023/03/21/boliden-to-deploy-volvo-trucks-electric-models-underground-at-kankberg/ (дата обращения: 10. 04. 2026).

9. Дубинкин Д.М., Пашков Д.А., Тургенев И.А., 2021. Аккумуляторные батареи для карьерных самосвалов на электрической тяге. Современные тенденции и инновации в науке и производстве: Материалы X международной научно-практической конференции, Междуреченск, 22 апреля 2021 года. Междуреченск: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, С. 128.1 – 128.9. EDN: CRECRO

10. Хазин М.Л. Электрифицированный автотранспорт для подземных и открытых горных работ // Известия УГГУ. – 2019. – №1 (53). – С. 128-135. EDN: UBIAHD

11. Черепанов В.А. Журавлев А.Г., Глебов И.А., Чендырев М.А., 2019. Обзор транспорта с электропитанием в фокусе развития горнодобывающих предприятий. Проблемы недропользования. – 2019. – №1 (20). – С. 33 – 49. EDN: TTEPEW

12. Investigation of Fast Charging and Battery Swapping Options for Electric Haul Trucks in Underground Mines. – Режим доступа: https://medatech.ca/fast-charging-beats-battery-swapping-for-underground-electric-haul-trucks/ (дата обращения: 10. 04. 2026).

13. The 100% electric mine - Converting the biggest diesels to electric. – Режим доступа: https://www.nrcan.gc.ca/science-and-data/funding-partnerships/funding-opportunities/current-investments/the-100-electric-mine-converting-the-biggest-diesels-electric/22639 (дата обращения: 10.04.2026).

14. Solid Ground // Sandvik Mining and Rock Solutions. – Режим доступа: Sandvik Solid Ground (дата обращения: 10. 04. 2026).

УДК 621.311:004.8

Ломовацкий И. Е.
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЧАСОВЫХ И ПОМЕСЯЧНЫХ ТАРИФНЫХ ПАРАМЕТРОВ РОЗНИЧНОГО РЫНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается прогнозирование почасовых и помесячных тарифных параметров розничного рынка электрической энергии. Анализируются почасовые ценовые ряды, месячные тарифы первой ценовой категории, ставки за мощность и ставки тарифа на услуги по передаче электрической энергии. Для построения прогнозов используются лаговые модели, Ridge Regression, HistGradientBoostingRegressor, XGBoost и LightGBM. Качество моделей оценивается по MAE и RMSE в руб./кВт·ч, а также по sMAPE. Полученные результаты показывают, что для разных групп параметров эффективны разные подходы: Ridge Regression показала лучшие результаты при прогнозировании месячных тарифов первой ценовой категории, лаговая модель оказалась наиболее устойчивой для ставок тарифа на услуги по передаче электрической энергии, а бустинговая модель показала небольшое преимущество над лаговой при расчёте ставки за мощность. Практическая значимость работы связана с подготовкой прогнозных тарифных данных для последующего расчёта стоимости электроснабжения.

Ключевые слова: прогнозирование тарифных параметров, почасовые тарифы, месячные тарифы, розничный рынок электроэнергии, машинное обучение, Ridge Regression, градиентный бустинг, лаговые модели, ставка за мощность, услуги по передаче электрической энергии.

Введение

Расчёт стоимости электроснабжения на розничном рынке электрической энергии зависит не только от объёма потребления, но и от тарифных параметров, используемых для соответствующей ценовой категории. Эти параметры имеют разную временную детализацию: часть из них задаётся в почасовом разрезе, часть изменяется помесячно. В исследованиях по прогнозированию тарифов отмечается, что почасовое изменение ставок на розничном рынке создаёт возможности для более гибкого управления нагрузкой и оценки будущих затрат потребителя [1].

Значительная часть работ в энергетике посвящена прогнозированию электропотребления, поскольку точность прогноза влияет на планирование закупок электроэнергии, снижение рисков небаланса и финансовые показатели энергосбытовых компаний [2, с. 246]. Однако для практической задачи расчёта стоимости одного прогноза нагрузки недостаточно: итоговая оценка зависит также от будущих почасовых тарифных параметров, месячных

тарифов первой ценовой категории, ставок за мощность и ставок тарифа на услуги по передаче электрической энергии.

Проблема исследования состоит в том, что указанные группы тарифных параметров отличаются характером динамики, масштабом значений и степенью инерционности, поэтому требуют раздельного анализа и сравнения прогнозных подходов. В статье рассматриваются лаговые модели, Ridge Regression и бустинговые алгоритмы, применяемые к разным группам тарифных параметров. Для оценки качества используются MAE, RMSE и sMAPE, поскольку совместное применение нескольких метрик позволяет учитывать как абсолютную величину ошибки, так и относительное отклонение прогноза [3, с. 679]. Цель статьи – определить, какие модели наиболее применимы для прогнозирования почасовых и помесячных тарифных параметров розничного рынка электрической энергии.

Обзор литературы и подходов к прогнозированию тарифных параметров

Наиболее близкой к теме настоящего исследования является работа П.В. Матренина, А.Ю. Арестовой и Д.В. Антоненкова, посвящённая среднесрочному прогнозированию почасовых тарифов на электроэнергию на розничном рынке на примере Новосибирской области. Авторы подчёркивают, что для отдельных групп потребителей ставка тарифа на розничном рынке меняется каждый час, что создаёт возможность регулирования графика нагрузки с учётом будущей стоимости электроэнергии [1]. В связи с этим, прогнозирование тарифов рассматривается не как самостоятельная математическая задача, а как инструмент снижения затрат за счёт адаптации графика электропотребления к ожидаемой динамике ставок [1].

Вместе с тем текущая работа отличается от исследования Матренина, Арестовой и Антоненкова по постановке эксперимента. В их статье основной акцент сделан на прогнозировании почасовой ставки тарифа с применением ансамблевых моделей, причём авторы показывают возможность прогноза на месяц вперёд со средней ошибкой 4–5 % [1]. В настоящем исследовании прогнозируемые параметры разделяются на несколько групп: почасовые тарифные параметры, месячные тарифы первой ценовой категории, ставки за мощность и ставки тарифа на услуги по передаче электрической энергии. Такое разделение необходимо, поскольку эти ряды отличаются частотой наблюдений, масштабом значений и характером изменения.

Выбор моделей также опирается на существующие подходы к прогнозированию энергетических и табличных временных рядов. Практическая значимость прогнозирования для энергосбытовых компаний подчёркивается в работе А.Ю. Горшенина, где точность прогноза связывается с оптимизацией закупок электроэнергии и снижением рисков небаланса [2, с. 246]. Ridge Regression используется как регуляризованная линейная модель,

применимая при наличии взаимосвязанных признаков, поскольку классическая работа A.E. Hoerl и R.W. Kennard описывает её как способ стабилизации оценок при неортогональности факторов [3, с. 55]. Бустинговые алгоритмы включены в сравнение как современные модели деревьев решений: XGBoost рассматривается как масштабируемая система градиентного бустинга [4, с. 785], а LightGBM – как эффективная реализация GBDT для табличных данных [5, с. 1]. Для оценки качества используются MAE, RMSE и sMAPE, поскольку совместное применение нескольких метрик позволяет учитывать как абсолютную величину ошибки, так и относительное отклонение прогноза [6, с. 679].

Исходные данные и структура прогнозируемых параметров

Исходными данными исследования являются тарифные параметры АО «Петербургская сбытовая компания» за период с января 2016 г. по апрель 2026 г по Санкт-Петербургу и Ленинградской области. Данные относятся к розничному рынку электрической энергии и используются для расчёта стоимости электроснабжения по различным ценовым категориям. Информационная база включает как почасовые тарифные параметры, так и помесячные показатели: месячные тарифы первой ценовой категории, ставки за мощность и ставки тарифа на услуги по передаче электрической энергии.

Использование данных, опубликованных Гарантирующим Поставщиком, имеет нормативное основание. Постановлением Правительства РФ от 21.01.2004 № 24 утверждены стандарты раскрытия информации субъектами оптового и розничных рынков электрической энергии [7].

В связи с этим тарифные данные, используемые в исследовании, рассматриваются как открытая и воспроизводимая информационная база. Это особенно важно для практического применения результатов: модель прогнозирования должна опираться не на закрытые внутренние сведения, а на параметры, которые могут быть получены из официально раскрываемых источников. Такой подход позволяет использовать результаты не только для ретроспективного анализа, но и для последующего расчёта стоимости электроснабжения и подготовки рекомендаций по выбору ценовой категории.

Структурно данные были разделены на две группы по временной детализации. Первая группа включает почасовые тарифные параметры. Они представлены в разрезе даты и часа и применяются при расчёте стоимости по третьей и четвёртой ценовым категориям. Для таких рядов характерна более высокая частота наблюдений, поэтому при прогнозировании могут использоваться календарные признаки, лаги по часам, признаки рабочих дней и пиковых периодов.

Вторая группа включает помесячные тарифные параметры. В рамках исследования они дополнительно разделены на три самостоятельных блока: тарифы первой ценовой категории, ставки за мощность и ставки тарифа на

услуги по передаче электрической энергии. Такое разделение необходимо, поскольку указанные параметры отличаются экономическим смыслом, масштабом значений и характером изменения во времени. Например, ставки тарифа на услуги по передаче электрической энергии могут иметь ступенчатую динамику: в течение нескольких месяцев значение остаётся неизменным, а затем меняется скачкообразно. Поэтому единая модель для всех помесячных параметров могла бы искажать результаты сравнения.

Для дальнейшего анализа исходные данные были приведены к единой табличной структуре. Почасовые параметры представлены в формате «дата – час – тарифный параметр – значение», а помесячные параметры – в формате «месяц – наименование параметра – регион – группа параметра – значение». Такая структура позволяет применять единый подход к формированию признаков, проводить walk-forward-проверку моделей и сопоставлять качество прогноза по MAE, RMSE и sMAPE.

Постановка эксперимента и методика оценки качества

Эксперимент построен с учётом различий между почасовыми и помесячными тарифными параметрами. Для почасовых рядов использовались календарные признаки, лаговые значения, признаки рабочих дней и пиковых часов. Пиковые часы ЕНЭС известны заранее на весь год, поэтому рассматривались как плановый расчётный параметр. Пиковые часы гарантирующего поставщика в последние годы демонстрируют устойчивую повторяемость, хотя в перспективе их структура может изменяться.

В работе сравнивались не только разные алгоритмы, но и разные наборы признаков. Это необходимо, поскольку расширение признакового пространства не всегда улучшает прогноз: часть признаков отражает устойчивую сезонность и инерционность ряда, а часть может вносить избыточный шум, усиливать переобучение и снижать качество на независимом периоде. Поэтому для почасовых параметров проверялись конфигурации с календарными, лаговыми и расширенными наборами признаков. Для помесячных параметров использовались месячные лаги, скользящие средние и календарные характеристики.

Помесячные тарифные параметры были разделены на три самостоятельных блока: тарифы первой ценовой категории, ставки за мощность и ставки тарифа на услуги по передаче электрической энергии. Такое разделение связано с различием их экономического смысла, масштаба значений и характера динамики. Объединение всех помесячных параметров в одну модель могло бы исказить результаты: крупные ставки сильнее влияли бы на MAE и RMSE, а относительная ошибка по малым тарифам непропорционально отражалась бы в sMAPE.

В качестве базовых моделей использовались лаговые прогнозы. Для почасовых параметров проверялись лаги, отражающие суточную, недельную,

месячную и годовую повторяемость. Для помесячных параметров применялись лаги на 1, 2, 3, 6 и 12 месяцев, а также скользящие средние за 3, 6 и 12 месяцев. Эти модели служили контрольным уровнем: если более сложный алгоритм не превосходит лаговый прогноз, его применение не даёт существенного практического выигрыша.

Среди обучаемых моделей были рассмотрены Ridge Regression, HistGradientBoostingRegressor, XGBoost и LightGBM. Ridge Regression выделялась отдельно, поскольку регуляризация стабилизирует модель при наличии взаимосвязанных признаков, что важно при использовании лагов и скользящих средних [4, с. 55]. Для неё проводился подбор параметра регуляризации α на валидационном периоде. Бустинговые алгоритмы включались как более гибкие модели, способные выявлять нелинейные зависимости в табличных данных [5, с. 785; 6, с. 1].

Оценка качества проводилась по схеме walk-forward: на каждом шаге модель обучалась только на данных, предшествующих прогнозируемому периоду. Сначала разные комбинации моделей и признаков сравнивались на валидационном периоде; затем выбранные конфигурации проверялись на тестовом периоде, который не использовался при подборе параметров и признакового пространства.

Качество прогноза оценивалось по MAE, RMSE и sMAPE. MAE и RMSE рассчитывались в руб./кВт·ч и отражали абсолютную ошибку прогноза, причём RMSE сильнее реагирует на крупные отклонения. sMAPE использовалась для оценки относительной ошибки в процентах и сопоставления параметров разного масштаба. Совместное применение нескольких метрик позволяет избежать односторонней интерпретации качества прогноза [3, с. 679].

Результаты прогнозирования почасовых тарифных параметров

Окончательная проверка моделей выполнялась на тестовом периоде, который не использовался при подборе конфигураций. Для почасовых тарифных параметров наиболее устойчивым оказался недельный лаговый прогноз: модель Lag_168 заняла первое место сразу по MAE, RMSE и sMAPE. Это указывает на выраженную недельную повторяемость почасовых тарифных рядов. При этом обучаемые модели сохраняют практический интерес: LightGBM и XGBoost вошли в тройку лучших по отдельным метрикам, однако не превзошли лаговую модель на независимом тестовом периоде, что видно в таблице 1.

Таблица 2 – Топ-3 модели прогнозирования почасовых тарифных параметров на тестовом периоде

Модель	MAE, руб./кВт·ч	RMSE, руб./кВт·ч	sMAPE, %
Lag_168 baseline	0,178	0,238	4,725

Модель	MAE, руб./кВт·ч	RMSE, руб./кВт·ч	sMAPE, %
LightGBM, calendar_and_lags	0,194	0,286	4,949
XGBoost, calendar_and_lags	0,195	0,288	4,950

Из результатов следует, что для почасовых тарифных параметров простые недельные лаги выступают сильным базовым уровнем, а применение более сложных моделей требует дополнительной проверки устойчивости на новых периодах.

Результаты прогнозирования помесячных тарифных параметров

Помесячные тарифные параметры анализировались отдельно по трём группам: тарифы первой ценовой категории, ставки за мощность и ставки тарифа на услуги по передаче электрической энергии. Такое разделение позволило избежать смешения рядов разного масштаба и получить более корректную интерпретацию результатов. Окончательная проверка выполнялась на тестовом периоде, который не использовался при подборе моделей, параметров и наборов признаков.

Наиболее устойчивый результат для тарифов первой ценовой категории показала Ridge Regression. Модель с параметром регуляризации $\alpha=30$ превзошла лаговый прогноз предыдущего месяца по MAE, RMSE и sMAPE. Это указывает на то, что динамика месячных тарифов первой ценовой категории не сводится только к инерционному повторению предыдущего значения: лаги, скользящие средние, региональные признаки и уровень напряжения дают дополнительную информацию, которую регуляризованная линейная модель способна использовать.

Для ставок за мощность лучший результат показала бустинговая модель HistGradientBoostingRegressor. Ее преимущество над лаговой моделью оказалось небольшим, однако оно проявилось по всем основным метрикам. Это позволяет говорить не о радикальном превосходстве сложной модели, а о её умеренной пользе при прогнозировании данной группы параметров. Вероятно, ставка за мощность сохраняет значительную инерционность, но при этом содержит отдельные изменения, которые бустинговая модель описывает немного точнее, чем простой прогноз по предыдущему месяцу.

Иная картина получена для ставок тарифа на услуги по передаче электрической энергии. Здесь лучшей по MAE и sMAPE оказалась лаговая модель Baseline_lag1, то есть прогноз, равный значению предыдущего месяца. Такой результат объясняется ступенчатым характером ряда: в большинстве месяцев ставка остаётся неизменной, а основная ошибка возникает в месяцы её пересмотра.

Таблица 3 – Лучшие результаты прогнозирования помесячных тарифных параметров на тестовом периоде

Группа параметров	**Лучшая модель**	**MAE, руб./кВт·ч**	**RMSE, руб./кВт·ч**	**sMAPE, %**
Тарифы 1 ЦК	Ridge Regression, α=30	0,209	0,221	2,463
Ставки за мощность	HistGradientBoostingRegressor	57,562	57,564	5,571
Ставки тарифа на услуги по передаче электроэнергии	Baseline_lag1	20,098	88,701	0,823

Полученные результаты показывают, что помесячные тарифные параметры нельзя прогнозировать одной универсальной моделью. Для тарифов первой ценовой категории наилучшей оказалась регуляризованная линейная модель, для ставки за мощность – бустинговая модель с небольшим преимуществом над лаговым прогнозом, а для ставки тарифа на услуги по передаче электрической энергии – простая инерционная модель. Следовательно, при построении прогнозного слоя тарифных параметров целесообразно выбирать модель отдельно для каждой группы показателей, учитывая их экономический смысл и характер изменения во времени.

Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают, что прогнозирование тарифных параметров розничного рынка электрической энергии не следует рассматривать как единую задачу для всех типов данных. Почасовые тарифные параметры, месячные тарифы первой ценовой категории, ставки за мощность и ставки тарифа на услуги по передаче электрической энергии различаются временной детализацией, масштабом значений и механизмом изменения. Поэтому качество моделей необходимо оценивать отдельно для каждой группы параметров.

Высокое качество лаговых моделей объясняется тем, что значительная часть тарифных рядов обладает выраженной инерционностью. Для почасовых параметров это проявляется в недельной повторяемости значений, а для ставки тарифа на услуги по передаче электрической энергии – в ступенчатой динамике, когда значение может сохраняться неизменным в течение нескольких месяцев. В таких условиях простой прогноз по предыдущему сопоставимому периоду оказывается не слабым формальным ориентиром, а содержательно обоснованной базовой моделью.

В то же время результаты по месячным тарифам первой ценовой категории и ставкам за мощность показывают, что инерционного подхода достаточно не всегда. Ridge Regression оказалась эффективной для рядов с более плавной динамикой, где лаги и скользящие средние содержат

дополнительную информацию о тренде. Бустинговая модель дала небольшое преимущество при прогнозировании ставки за мощность, что может указывать на наличие отдельных нелинейных зависимостей, которые хуже описываются простой лаговой схемой.

Таким образом, основным результатом эксперимента является не выбор одной универсальной модели, а подтверждение необходимости дифференцированного подхода. Для стабильных и ступенчатых рядов оправдано использование лаговых моделей, для более плавных месячных тарифов – регуляризованной линейной модели, а для отдельных параметров с более сложной динамикой – бустинговых алгоритмов. Такой подход позволяет сформировать более надёжную прогнозную тарифную базу для последующего расчёта стоимости электроснабжения.

Заключение

В статье рассмотрена задача прогнозирования почасовых и помесячных тарифных параметров розничного рынка электрической энергии. Показано, что разные группы параметров требуют различных прогнозных подходов. Для почасовых тарифных параметров наиболее устойчивым оказался недельный лаговый прогноз, для месячных тарифов первой ценовой категории – Ridge Regression, для ставок за мощность – бустинговая модель с небольшим преимуществом над лаговой, а для ставок тарифа на услуги по передаче электрической энергии – прогноз по предыдущему месяцу. Полученные результаты могут быть использованы при формировании прогнозной тарифной базы для последующего расчёта стоимости электроснабжения и выбора ценовой категории.

Список литературы:

1. Матренин П. В., Арестова А. Ю., Антоненков Д. В. Среднесрочное прогнозирование почасовых тарифов на электроэнергию с помощью ансамблевых моделей // Problemele Energeticii Regionale. – 2022. – № 2(54). – С. 26-37. DOI: 10.52254/1857-0070.2022.2-54.03 EDN: WKUIHP

2. Горшенин А. Ю. Применение деревьев решений для краткосрочного прогнозирования электропотребления // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2024. – №7. – С. 246–253. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-246-247 EDN: ZCJJNA

3. Hyndman R. J., Koehler A. B. Another look at measures of forecast accuracy // International Journal of Forecasting. – 2006. – Vol. 22, № 4. – P. 679–688. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2006.03.001

4. Hoerl A. E., Kennard R. W. Ridge Regression: Biased Estimation for Nonorthogonal Problems // Technometrics. – 1970. – Vol. 12, № 1. – P. 55–67. - DOI: 10.1080/00401706.1970.10488634

5. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2016. – P. 785–794. DOI: 10.1145/2939672.2939785

6. Ke G., Meng Q., Finley T., Wang T., Chen W., Ma W., Ye Q., Liu T.-Y. LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. – Vol. 30.

7. Постановление Правительства РФ от 21.01.2004 № 24 «Об утверждении стандартов раскрытия информации субъектами оптового и розничных рынков электрической энергии»: ред. от 31.08.2023 [Электронный ресурс]. – URL: https://base.garant.ru/186671/?ysclid=mq4az49tnr922082641 (дата обращения: 06.06.26).

УДК 004.056:004.773

Хайруллина Г. Ф., Набиев Д. Т., Фатхелисламов А. Ф.
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАЩИЩЁННОГО ПОЧТОВОГО КЛИЕНТА КРИПТОАРМ ГОСТ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЕРЕПИСКИ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы обеспечения безопасности электронной почты в корпоративной информационной среде. Раскрыты особенности применения защищённого почтового клиента КриптоАРМ ГОСТ для обеспечения безопасности электронной переписки. Рассматриваются и анализируются проблемы информационной безопасности (ИБ) при работе с электронной почтой, а также их решение путем использования КриптоАРМ ГОСТ. Показано, что внедрение почтового клиента «КриптоАРМ ГОСТ» способствует повышению уровня информационной безопасности в организациях, обеспечивая конфиденциальность, целостность и доступность передаваемой информации.

Ключевые слова: защита информации, информационная безопасность, почта, электронная почта, почтовый клиент, шифрование, криптография, электронная подпись.

В настоящее время электронная почта является одним из наиболее распространённых средств обмена информацией между физическими лицами и современными организациями. Вместе с тем сообщения, отправляемые по электронной почте, могут содержать конфиденциальные данные, служебную информацию и документы ограниченного доступа, что делает их объектом посягательств злоумышленников. Основными угрозами безопасности электронной почты являются:

- несанкционированный доступ (НСД) к сообщениям;
- перехват данных при передаче;
- подмена отправителя;
- распространение вредоносного программного обеспечения;
- фишинговые атаки и др. [3].

Бесплатная почтовая программа Thunderbird является одним из наиболее распространённых программных средств для работы с электронной почтой в Российской Федерации. Его популярность обусловлена свободным распространением, открытым исходным кодом, поддержкой различных почтовых протоколов (POP3-предназначен для получения писем; IMAP-позволяет работать с письмами прямо на почтовом сервере, не загружая их полностью на устройство; SMTP-предназначен для отправки электронных писем) и широкими возможностями настройки программного обеспечения

(ПО) [5]. Thunderbird широко используется в коммерческих организациях, в государственных учреждениях и среди частных пользователей.

Программное обеспечение обеспечивает централизованное управление несколькими почтовыми аккаунтами, поддержку фильтрации сообщений, календарей, адресных книг и расширений, что позволяет качественно и эффективно организовать документооборот и обмен информацией между пользователями. Благодаря кроссплатформенности Thunderbird может использоваться в операционных системах (ОС) Windows, Linux и macOS.

При этом в условиях возрастающих требований к защите информации и импортонезависимости программного обеспечения в РФ особое значение приобретает использование отечественных средств криптографической защиты и применения почтовых программ. В целях предотвращения несанкционированного доступа к электронным сообщениям и обеспечения конфиденциальности передаваемой информации рекомендуется использовать российский почтовый клиент «КриптоАРМ ГОСТ» (рисунок 1).

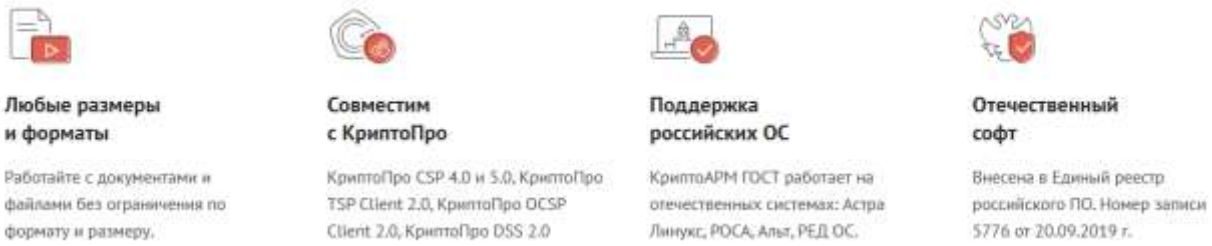


Рисунок 1 – Особенности ПО КриптоАРМ ГОСТ

Данное программное обеспечение разработано компанией «Цифровые технологии» и предназначено для организации защищённого электронного документооборота и безопасной электронной почты. Программное обеспечение доступно для установки на ПК и мобильных устройствах пользователей (рисунок 2).

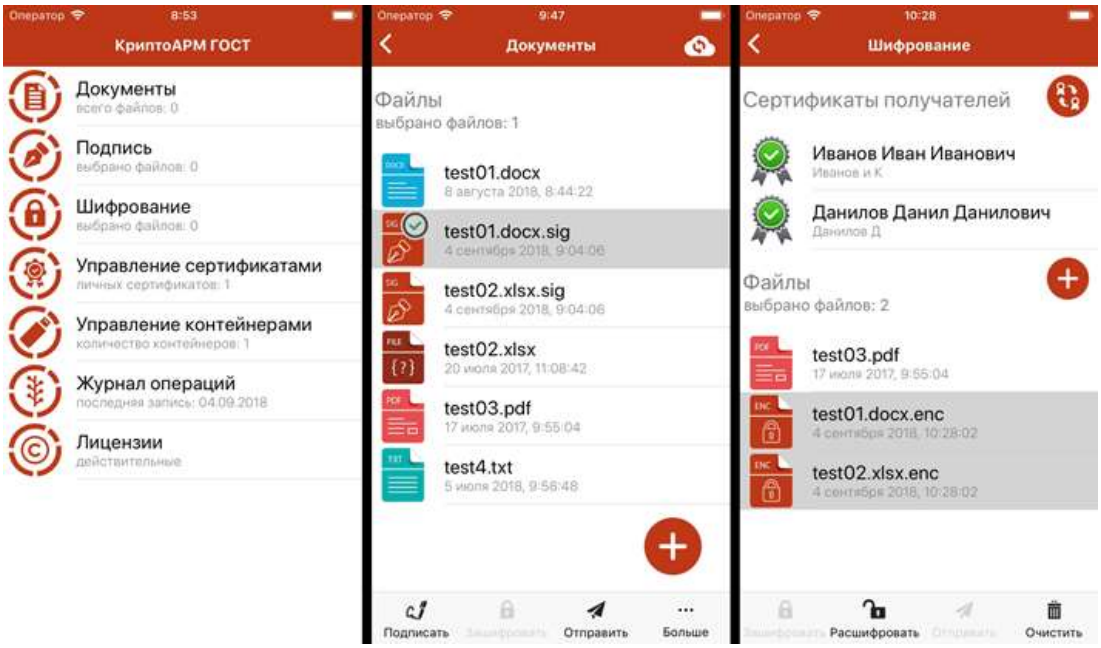


Рисунок 2 – Мобильное приложение КриптоАРМ ГОСТ

Одним из важных преимуществ использования отечественных средств криптографической защиты, в том числе и «КриптоАРМ ГОСТ» является возможность создания юридически значимого электронного документооборота. ПО поддерживает применение квалифицированной и неквалифицированной электронной подписи в соответствии с требованиями Федерального закона № 63-ФЗ «Об электронной подписи». Использование электронной подписи обеспечивает подтверждение авторства документа, контроль его целостности и юридическую значимость электронного обмена документами [7]. Для формирования и проверки электронной подписи применяются отечественные криптографические стандарты ГОСТ Р 34.10–2012 и ГОСТ Р 34.11–2012, обеспечивающие высокий уровень защиты информации и соответствие требованиям российского законодательства в области информационной безопасности (ИБ). Дополнительным преимуществом является отсутствие ограничений на количество подписей, накладываемых на один документ, что позволяет организовать многоуровневые процессы согласования и утверждения документов в рамках корпоративного документооборота.

Также одним из ключевых требований к современным системам электронного документооборота и почтовым клиентам является обеспечение надёжной защиты конфиденциальных данных, включая персональные данные (ПДн) пользователей [4]. Для решения данной задачи в «КриптоАРМ ГОСТ» используются средства криптографической защиты информации, реализующие отечественные стандарты шифрования. Защита информации обеспечивается посредством применения алгоритмов шифрования,

регламентированных стандартом ГОСТ Р 34.12–2015 (ГОСТ 34.12–2018), что позволяет предотвратить НСД к передаваемым и хранимым данным. Использование криптографических механизмов обеспечивает конфиденциальность информации и при передаче по каналам электронной почты, и при долговременном хранении в информационных системах организации.

Применение средств шифрования в «КриптоАРМ ГОСТ» способствует выполнению требований Федерального закона № 152-ФЗ «О персональных данных». Федеральный закон устанавливает необходимость принятия организационных и технических мер по защите персональных данных от неправомерного доступа, изменения, распространения или уничтожения. В частности, документы, которые содержат ПДн, могут храниться в зашифрованном виде, что существенно снижает угрозы безопасности информации в случае утраты носителей или несанкционированного доступа к информационной системе организации. Таким образом, использование отечественных криптографических средств обеспечивает высокий уровень защиты конфиденциальной информации, соответствие требованиям законодательства Российской Федерации и повышение общей безопасности корпоративных информационных ресурсов организации.

В ходе установки программного обеспечения «КриптоАРМ ГОСТ» выполняется автоматическая настройка рабочего места, включая конфигурирование необходимых компонентов для работы с электронной подписью, сертификатами и механизмами шифрования данных. Данный подход снижает вероятность ошибок при настройке, сокращает время развертывания системы и обеспечивает корректное функционирование почтового клиента.

Автоматизированная подготовка рабочего места способствует быстрому вводу системы в эксплуатацию и обеспечивает готовность пользователя к безопасному обмену электронными документами в соответствии с требованиями информационной безопасности и действующего законодательства Российской Федерации.

Подводя итог, делаем вывод, что почтовый клиент «КриптоАРМ ГОСТ» обладает расширенной функциональностью, обеспечивающей защищённый электронный документооборот и криптографическую защиту информации.

Основные возможности системы.

1. Выполнение стандартных операций с электронными письмами: получение, отправка, редактирование, сортировка и др.
2. Организация рабочего места для защищённого юридически значимого электронного документооборота.
3. Шифрование и расшифрование электронных документов, а также их подписание электронной подписью.

4. Использование специальных папок для хранения конфиденциальной информации.

5. Возможность удаления электронных писем с почтового сервера.

6. Поддержка работы с российскими ключевыми носителями, включая JaCarta, Рутокен, ESMART ГОСТ и АНГАРА.

7. Наличие Portable-версии, позволяющей работать с системой без установки на компьютер, в том числе с флеш-накопителей.

8. Поддержка различных операционных систем, включая отечественные ОС (Аврора, Альт, РОСА, Astra Linux, РЕД ОС), а также Windows и macOS

9. Возможность импорта и экспорта ключей электронной подписи.

10. Генерация запросов на создание сертификатов электронной подписи.

11. Визуализация машиночитаемых доверенностей (МЧД) в формате PDF-документов.

В результате проведенного анализа функциональных возможностей и особенностей применения российского ПО «КриптоАРМ ГОСТ» было установлено, что данное средство представляет собой комплексное решение для обеспечения защищённого электронного документооборота организации. Продукт сочетает в себе как стандартные функции работы с электронной почтой с расширенными механизмами криптографической защиты информации, так и включает в себя шифрование, электронную подпись и управление ключевой инфраструктурой.

Также одним из достоинств ПО является использование отечественных криптографических алгоритмов и поддержка требований законодательства Российской Федерации:

-Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных»;

- Федеральный закон от 06.04.2011 N 63-ФЗ «Об электронной подписи».

Почтовый клиент «КриптоАРМ ГОСТ» позволяет обеспечить юридическую значимость электронных документов и высокий уровень защиты конфиденциальной информации. Дополнительные функциональные возможности почтового клиента, такие как поддержка различных ключевых носителей, работа с отечественными операционными системами, наличие мобильной версии приложения и средства управления сертификатами, повышают универсальность и удобство применения системы в различных организациях.

Таким образом, внедрение «КриптоАРМ ГОСТ» способствует повышению уровня информационной безопасности, обеспечению конфиденциальности и целостности данных, а также организации надёжного и юридически значимого электронного документооборота. В общем смысле защита электронной почты является обязательным элементом современной

системы информационной безопасности организации и должна включать комплекс организационных и технических мер, направленных на обеспечение конфиденциальности, целостности и доступности передаваемой конфиденциальной информации.

Список литературы:

1. Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ (ред. от 24.06.2025) «О персональных данных» (с изм. и доп., вступ. в силу 01.09.2025). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/ (дата обращения 28. 04. 2026).

2. Федеральный закон от 06.04.2011 N 63-ФЗ (ред. от 31.07.2025) «Об электронной подписи» (с изм. и доп., вступ. в силу 01.03.2026). – URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=504436#h184 (дата обращения 28. 04. 2026).

3. Зырянова, Т. Ю. Управление информационной безопасностью: учебное пособие / Т. Ю. Зырянова. – Екатеринбург, 2023. – 96 с. – Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/369482 (дата обращения: 08.06.2026).

4. Окороков, В. А. Безопасность операционных систем / В. А. Окороков. – Санкт-Петербург: Лань, 2024. – С. 228.

5. Парфёнов, Ю. П. Средства управления и защиты информационных ресурсов автоматизированных систем: учебное пособие / Ю. П. Парфёнов. - Москва: ФЛИНТА, 2022. – С.120.

6. Рацеев, С. М. Криптография. Безопасные многосторонние вычисления: учебное пособие для СПО / С. М. Рацеев. – Санкт-Петербург: Лань, 2025. – С. 540.

7. Тумбинская, М. В. Защита информации на предприятии: учебное пособие для вузов / М. В. Тумбинская, М. В. Петровский. – 2-е изд., стер. -Санкт-Петербург: Лань, 2025. – С.184.

УДК 004.45:004.92

Ушаков Д. П., Кочемиров М. А.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

SKIA И IMPELLER: АНАЛИЗ ПРИЧИН И ПОСЛЕДСТВИЙ ПЕРЕХОДА FLUTTER НА СОБСТВЕННЫЙ ГРАФИЧЕСКИЙ ДВИЖОК

Аннотация. Статья посвящена переходу кроссплатформенного фреймворка Flutter с графического движка общего назначения Skia на собственный движок Impeller. В литературе этот переход объясняют выигрышем производительности, однако его причины и издержки разобраны фрагментарно. Средствами аналитического обзора, на материале официальной документации Flutter, issue-трекера проекта и более ранних эмпирических замеров, показано, что переход вызван не отдельным показателем быстродействия, а сочетанием архитектурных и экосистемных причин. Выигрыши Impeller, такие как предсказуемый бюджет кадра и прямой доступ к нативному API, сопоставлены с издержками, зафиксированными в трекере самого проекта: регрессиями в отдельных сценариях, разным поведением устройств с Vulkan и без него, незавершенностью перехода на вебе и настольных платформах. Новизна работы заключается в обобщении этой картины по первичным источникам: переход оценен вместе с его издержками и открытыми вопросами.

Ключевые слова: кроссплатформенная разработка, графический рендеринг, графический движок, Flutter, Skia, Impeller, компиляция шейдеров.

Введение

Flutter отрисовывает интерфейс сам, не обращаясь к платформенным виджетам, поэтому плавность анимаций и время отклика приложения напрямую зависят от графического движка. Изначально эту задачу решала Skia – библиотека 2D-графики общего назначения, пришедшая во Flutter из Chrome и Android. У такого решения была устойчивая слабость: Skia компилировала шейдеры в момент работы приложения (Just-In-Time), и это вызывало паузы при первом проигрывании анимаций и переходов – эффект, известный как shader compilation jank.

Чтобы устранить эту проблему на уровне архитектуры, команда Flutter разработала собственный движок Impeller, который предкомпилирует меньший и более простой набор шейдеров на этапе сборки, так что во время выполнения они не компилируются. На iOS Impeller работает по умолчанию с релиза 3.10, а с версии 3.29 поддержка Skia из iOS удалена полностью. На Android он включен по умолчанию для устройств с API 29 и выше начиная с релиза 3.27, на более старых версиях и при отсутствии Vulkan движок переключается на запасной бэкенд, и отключить Impeller на Android пока еще

можно [1]. Дорожная карта проекта на 2026 год идет дальше: в ее цели входит завершение миграции на Impeller на Android и удаление legacy-бэкенда Skia на Android 10 и выше [2]. Выбор между движками тем самым закрывается, и практический вопрос «какой движок предпочесть» теряет смысл. Актуальным становится другой: чем вызван переход и какими последствиями он сопровождается.

Прямое сравнение Skia и Impeller уже предпринималось. В тезисах Д. А. Алешичева на одном устройстве измерены частота кадров, время рендеринга интерфейса и время растеризации, а вывод сведен к тому, что выбор движка зависит от требований проекта [3]. Эта работа дает эмпирический снимок на конец 2023 года и трактует движки как сосуществующую альтернативу. Систематического разбора причин самого перехода и его издержек в литературе нет.

Настоящая статья восполняет этот пробел. На ней обосновывается тезис: переход вызван не выигрышем в быстродействии, а причинами на нескольких уровнях – технической, архитектурной и экосистемной, ни одна из которых не сводится к отдельному замеру производительности, при этом он не является односторонне положительным и сопровождается компромиссами, а за пределами мобильных платформ остается незавершенным на настольных платформах и вебе.

Архитектурные различия движков

Различие Skia и Impeller, определяющее весь дальнейший анализ, лежит в двух плоскостях: когда компилируются шейдеры и насколько близко движок работает с графическим API устройства.

Skia компилирует шейдеры во время выполнения. Шейдер – это небольшая программа для GPU, которая требуется под конкретное сочетание параметров отрисовки. В исходной архитектуре Flutter полный набор таких программ считали невозможным определить заранее, поэтому приложение компилировало их на ходу, при первом обращении, и затем кэшировало [4]. Пока кэш не наполнен – при первом проходе по участкам приложения, для которых шейдеры еще не скомпилированы, – компиляция идет прямо во время работы над кадром и ухудшает время худшего кадра, давая заметные подергивания анимаций и переходов, это и есть shader compilation jank [4]. Skia смягчала его «прогревом» – предварительной компиляцией и кэшированием нужных шейдеров при запуске. Но прием оказался хрупким: шейдеры платформозависимы и привязаны к версии приложения, прогрев перекладывал работу на разработчика, увеличивал размер сборки и замедлял старт, а гарантий не давал, и от него в итоге отказались. Это смягчение симптома, а не устранение причины [4].

Impeller строит конвейер иначе. Он компилирует шейдеры офлайн, на этапе сборки, и формирует все конвейерные объекты состояния (pipeline state

objects, PSO) заранее, а кэшированием управляет явно [1]. Набор шейдеров намеренно меньше и проще, что удерживает время старта и размер приложения в приемлемых границах [1]. Компиляция тем самым выведена из горячего пути кадра, и время отрисовки перестает зависеть от того, встречался ли эффект ранее.

Вторая плоскость касается того, как движок обращается к графическому API. Skia спроектирована как переносимая библиотека 2D-графики: она абстрагирует под собой разные бэкенды (исторически Ganesh поверх OpenGL, позже Metal и Vulkan) и обслуживает множество продуктов, от Chrome до Android [5]. Универсальность здесь выступает самостоятельной инженерной целью. Impeller действует противоположно: он описывает шейдеры один раз и переводит их в формат конкретного бэкенда, обращаясь к Metal на iOS и Vulkan на Android напрямую [1]. Движок рассчитан на конвейер Flutter, а не на широкий круг потребителей.

Обе плоскости сводятся к одному свойству: предсказуемости кадра. Перенос компиляции на этап сборки и прямой выход на нативный API убирают два источника неопределенности во время выполнения – позднюю компиляцию шейдеров и накладные расходы абстрагирующего слоя. Именно предсказуемость, а не отвлеченная «скорость», стала техническим смыслом перехода.

Оба различия – это одновременно и внутренние причины перехода. Поскольку «прогрев шейдеров» проблему не закрывает, jank оставался свойством самой модели Skia и потому был причиной, а не устранимой мелочью. Зависимость от движка общего назначения добавляла вторую: Flutter следовал чужому циклу развития, не управляя своим. Но переход отвечал и на внешние, экосистемные факторы, рассмотренные далее.

Экосистемные причины перехода

Внешние причины перехода связаны не с устройством движка, а с окружающей его экосистемой, основных факторов два.

Первый – стратегия единого движка. Дорожная карта проекта предусматривает завершение миграции на Impeller и удаление legacy-бэкенда Skia [2]. Поддержка двух движков сразу удваивает тестирование и сопровождение, и отказ от нее сам по себе становится мотивом, независимым от производительности.

Второй – сдвиг платформенных графических API. Apple еще в 2018 году объявила OpenGL ES устаревшим в пользу Metal, и отрасль в целом сместилась к низкоуровневым API [6]. На этом фоне движок, изначально рассчитанный на Metal и Vulkan [1], становился более долговечной опорой на платформах Apple, чем универсальный бэкенд.

Вместе с внутренними причинами это объясняет, почему сохранение Skia становилось все менее оправданным. Переход правильнее считать

структурным решением, ответом и на устройство движка, и на изменение внешней среды, а не реакцией на отдельный показатель быстродействия. Что это решение дало и чего потребовало взамен, показано далее.

Последствия перехода: что выиграно

Выигрыши Impeller вытекают из описанной выше предсказуемости кадра. Прежде всего это стабильный бюджет: раз компиляция шейдеров больше не идет во время выполнения, время кадра не зависит ни от сложности сцены, ни от того, впервые ли встретился эффект [1]. Выигрыш здесь не в ускорении отдельных операций, а в выравнивании времени кадра по всему приложению.

Отсюда же устойчивость на высокой частоте обновления: прямой выход на нативный API, отмеченный выше, вместе со стабильным бюджетом делает практически достижимой плавную работу на дисплеях 120 Гц, которые к 2026 году воспринимаются как норма, а не как преимущество.

Менее заметный, но практически важный выигрыш – инструментируемость. Impeller помечает все графические ресурсы и умеет сохранять запись анимаций на диск, не влияя на производительность кадра [1]. Это упрощает диагностику рендеринга, которая со Skia и ее неявным кэшированием давалась труднее.

Наконец, архитектура Impeller создает задел на 3D. На его основе разрабатываются интерфейс низкоуровневой графики Flutter GPU и библиотека Flutter Scene для показа 3D-моделей, а в самом движке есть экспериментальный рендерер сцен [7]. Однако данные возможности пока не получили широкого распространения, поэтому 3D правильнее считать потенциалом архитектуры, а не достигнутым преимуществом.

Последствия перехода: издержки и регрессии

Преимущество Impeller над Skia оказалось неравномерным, и видно это не из сторонней критики, а из собственного трекера проекта: часть регрессий зафиксирована в issue-репозитории Flutter и признана самой командой Impeller.

Самый показательный случай – платформенные представления. В issue #180831 (январь 2026) отмечено, что Impeller заметно уступает Skia при работе с Platform View и Texture, и эффект воспроизводится на нескольких устройствах [9]. Значимость выходит за рамки частного бага: через платформенные представления Flutter встраивает нативные компоненты (карты, веб-вью, видеоплеер), а это распространенный практический сценарий.

Иначе ведет себя и энергопотребление. В issue #156681 измерено, что при прокрутке списка Impeller расходует больше энергии, чем Skia, а время завершения работы GPU у него стабильно выше [10]. Команда здесь же отметила обратную сторону предсказуемости: повышенный расход на кадр

сокращает автономную работу на мощных телефонах и оборачивается пропуском кадров на слабых. У этой неоднородности есть конкретный источник – зависимость от Vulkan. На Android Impeller рассчитан на Vulkan, но без его поддержки откатывается на OpenGL ES, и в том же issue #156681 прямо сравниваются обе ветки, «impeller + vulkan» и «impeller + opengles» [10]. Поэтому единого утверждения о приросте здесь быть не может, часть таких проблем помечена как зависящая от устройства и остается открытыми рабочими задачами.

В ту же сторону указывали и более ранние замеры Алешичева Д.А.: по ряду сценариев, прежде всего по времени растеризации, Impeller уступал Skia, а выбор движка ставился в зависимость от приоритета – общей отзывчивости или времени рендеринга интерфейса [3]. Это не довод против перехода, а указание на его цену. Пока в перечисленных сценариях Skia остается лучшим вариантом, запланированное удаление legacy-бэкенда [2] заберет и тот запасной путь, который на таких нагрузках еще выручает.

Нерешенный вопрос: веб-рендеринг и настольные платформы

На мобильных платформах переход практически завершен, но две группы остаются на Skia – настольные платформы и веб. Причины разные: на настольных вопрос в сроках миграции, на вебе – в самом ее направлении.

Настольные платформы (Windows, macOS, Linux) по умолчанию рендерятся через Skia. Impeller здесь доступен только на macOS и только за флагом, как предварительная возможность [1]; Windows и Linux остаются на Skia. По ним официальная дорожная карта на 2026 год называет работу над многооконностью силами Canonical, а перевод на Impeller отдельной целью не ставит [2]. Заявленный ориентир – единый движок для всех платформ, но здесь он пока не достигнут. Нерешенность в сроках, а не в направлении.

Веб остается полностью на Skia: оба его рендерера, canvaskit и skwasm, опираются на Skia, скомпилированную в WebAssembly [11]. Приоритет дорожной карты для веба – сделать стандартной сборку в Wasm, а не переводить веб на Impeller [2]. Impeller, как уже отмечалось, рассчитан на нативные API (Metal, Vulkan), а у веба свои – WebGL и WebGPU, и готового бэкенда под них у Impeller нет. Вдобавок у веба есть и второй кандидат: собственный движок Skia нового поколения Graphite работает поверх WebGPU и уже применяется в Chrome [12]. Пойдет ли веб Flutter по пути Impeller с бэкендом WebGPU или по пути Graphite, к середине 2026 года не определено.

Переход, завершенный на мобильных платформах, на настольных еще не доведен до конца, а на вебе упирается в нерешенный стратегический выбор. Заявленная цель единого движка для всех платформ к середине 2026 года остается целью, а не свершившимся фактом.

Заключение

Проведенный разбор не подтверждает ходового объяснения, по которому Flutter сменил движок ради быстродействия. Причин у перехода несколько, и лежат они на разных уровнях. Техническая: компиляция шейдеров во время выполнения встроена в саму модель Skia, и «прогрев» ее лишь маскирует, а не снимает. Архитектурная: Skia обслуживает множество продуктов и развивается по чужому графику, тогда как Impeller подчинен единственной задаче – сделать время кадра предсказуемым. Экосистемная относится уже к внешней среде: поддержка двух движков дорога сама по себе, а отрасль успела сместиться от OpenGL к Metal и Vulkan. Ни одна из этих причин не сводится к показателю на стенде, поэтому переход уместнее описывать как структурный сдвиг, чем как ответ на отдельный замер.

Выигрыш от такого сдвига реален, но узок. Предсказуемый бюджет кадра, прямой доступ к нативному API, более удобная диагностика – все это вытекает из той же архитектуры, ради которой переход и затевался. Неоднородности добавляет откат на OpenGL там, где нет Vulkan: единое «Impeller против Skia» на деле распадается на несколько сравнений, зависящих от устройства. Типичный случай стал лучше ценой потерь в нетипичном.

Дальше мобильных платформ переход не дошел, причем причины несопоставимы. Настольные платформы остаются на Skia просто потому, что до него еще не добрались: на Windows и Linux альтернативы нет, на macOS Impeller держат под флагом, а в план на 2026 год его перевод не вписан. Это вопрос очередности. С вебом сложнее – Impeller рассчитан на нативные API, которых у браузера нет, а у самой Skia уже есть преемник под WebGPU, движок Graphite, работающий в Chrome. Если веб Flutter пойдет за ним, это будет не отказ от Skia, а возвращение к ней, то есть шаг, обратный мобильному.

Меняется при этом и прикладной вопрос. Раз выбор движка на мобильных устройствах фактически снят, разработчику важнее знать не «что включить», а «что перепроверить»: платформенные представления, сложную отрисовку путей и поведение на устройствах без Vulkan, где еще работает запасной бэкенд. Веб и десктоп, пока они держатся на Skia, мерить мобильной меркой тоже не стоит. У темы есть и понятное продолжение. Нынешняя доказательная база опирается на единичные замеры, и расширить ее стоило бы воспроизводимыми измерениями уже зафиксированных регрессий на разных устройствах. Отдельно стоит проследить за развилкой между Impeller на WebGPU и переходом на Graphite, исход которой к середине 2026 года еще открыт.

Список литературы:

1. Impeller rendering engine [Электронный ресурс] // Flutter: официальная документация. – URL: https://docs.flutter.dev/perf/impeller (дата обращения: 25.05.2026).

2. Flutter roadmap [Электронный ресурс] // GitHub: репозиторий flutter/flutter. – URL: https://github.com/flutter/flutter/blob/main/docs/roadmap/Roadmap.md (дата обращения: 25.05.2026).

3. Алешичев Д. А. Сравнительный анализ движков рендеринга Skia и Impeller в приложении Flutter / Д. А. Алешичев // Сборник тезисов XIII Конгресса молодых ученых. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2024. – С. 277-281. EDN: KWPGTI

4. Impeller engine FAQ [Электронный ресурс] // GitHub: репозиторий flutter/flutter. – URL: https://github.com/flutter/flutter/blob/main/docs/engine/impeller/docs/faq.md (дата обращения: 01.06.2026).

5. About Skia [Электронный ресурс] // Skia: официальный сайт. – URL: https://skia.org/about/ (дата обращения: 26.05.2026).

6. Migrating OpenGL Code to Metal [Электронный ресурс] // Apple Developer Documentation. – URL: https://developer.apple.com/documentation/metal/migrating-opengl-code-to-metal (дата обращения: 25.05.2026).

7. Impeller: a rendering runtime for Flutter [Электронный ресурс] // GitHub: репозиторий flutter/engine. – URL: https://github.com/flutter/engine/blob/main/impeller/README.md (дата обращения: 27.05.2026).

8. Getting Started with Flutter GPU [Электронный ресурс] // Flutter Blog. – URL: https://medium.com/flutter/getting-started-with-flutter-gpu-f33d497b7c11 (дата обращения: 01.06.2026).

9. Impeller has noticeably worse performance than Skia when using Platform View / Texture: Issue #180831 [Электронный ресурс] // GitHub: репозиторий flutter/flutter. – URL: https://github.com/flutter/flutter/issues/180831 (дата обращения: 01.06.2026).

10. [Impeller] Impeller performs worse than Skia in power consumption: Issue #156681 [Электронный ресурс] // GitHub: репозиторий flutter/flutter. – URL: https://github.com/flutter/flutter/issues/156681 (дата обращения: 27.05.2026).

11. Web renderers [Электронный ресурс] // Flutter: официальная документация. – URL: https://docs.flutter.dev/platform-integration/web/renderers (дата обращения: 26.05.2026).

12. Introducing Skia Graphite – Chrome's rasterization backend [Электронный ресурс] // Chromium Blog. – URL: https://blog.chromium.org/2025/07/introducing-skia-graphite-chromes.html (дата обращения: 01.06.2026).

УДК 528:004.8

Лу Мэнфань, Ван Цзяжуй
Таншаньский педагогический университет, Таншань, Китай

ОБРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ В ЭПОХУ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Аннотация. В условиях цифровой трансформации пространственные данные становятся важным ресурсом для государственного управления, территориального планирования и экологического мониторинга. Рост объемов геоинформационной информации требует внедрения новых методов ее обработки. В статье рассматриваются возможности применения технологий искусственного интеллекта в анализе пространственных данных. Особое внимание уделяется использованию методов машинного обучения и глубокого обучения в геоинформационных системах и дистанционном зондировании Земли. Анализируются основные преимущества, ограничения и перспективы развития интеллектуальных технологий обработки пространственной информации. Сделан вывод о том, что интеграция искусственного интеллекта и геоинформационных систем способствует повышению эффективности пространственного анализа и качества управленческих решений.

Ключевые слова: искусственный интеллект, пространственные данные, геоинформационные системы, машинное обучение, большие данные, дистанционное зондирование Земли, цифровизация, пространственный анализ.

Современное информационное общество характеризуется быстрым ростом объемов цифровой информации, большая часть которой имеет пространственную природу. Практически все процессы в окружающей среде и социальной жизни имеют территориальную привязку, что делает пространственные данные ключевым ресурсом для управленческих решений. Развитие спутниковых технологий, геоинформационных систем, беспилотных летательных аппаратов и мобильных устройств создает огромные массивы данных, требующих эффективной обработки и анализа.

Традиционные методы анализа не всегда справляются с растущими объемами информации, поэтому особое значение приобретают технологии искусственного интеллекта, позволяющие автоматически выявлять закономерности, строить прогнозные модели и поддерживать принятие решений. Актуальность исследования определяется важностью пространственных данных в цифровой экономике и необходимостью совершенствования методов их анализа с использованием ИИ. Цель работы – проанализировать современные направления применения ИИ в обработке пространственных данных, выявить проблемы и определить перспективы развития.

Методологическую основу составляют системный подход, сравнительный анализ и междисциплинарные методы. Исследование опирается на отечественные и зарубежные публикации по искусственному интеллекту, геоинформационным технологиям и пространственному анализу, с акцентом на машинное обучение и глубокое обучение в геоинформатике и дистанционном зондировании. Комплексный подход позволяет рассмотреть проблему на стыке нескольких научных направлений и выявить ключевые тенденции развития интеллектуальной обработки пространственной информации.

Под искусственным интеллектом понимается совокупность методов и технологий, позволяющих компьютерным системам выполнять задачи, традиционно требующие интеллектуальной деятельности человека [1]. В сфере обработки пространственных данных наибольшее распространение получили технологии машинного обучения, глубокого обучения, компьютерного зрения и интеллектуального анализа больших данных [2]. Их применение позволяет автоматизировать процессы классификации пространственных объектов, выявлять скрытые закономерности в географической информации, осуществлять прогнозирование различных природных и социально-экономических процессов, а также повышать точность пространственного моделирования.

Особое значение имеет использование искусственных нейронных сетей для обработки данных дистанционного зондирования Земли. Современные алгоритмы способны автоматически распознавать элементы городской инфраструктуры, сельскохозяйственные угодья, лесные массивы, водные объекты и другие категории земной поверхности с высокой степенью достоверности. Благодаря этому существенно сокращаются временные затраты на обработку данных и повышается качество принимаемых решений.

Одной из важнейших особенностей современных интеллектуальных систем является способность к самообучению на основе накопленных данных. В отличие от традиционных методов статистического анализа, алгоритмы искусственного интеллекта способны адаптироваться к изменяющимся условиям и повышать эффективность своей работы по мере увеличения объема доступной информации. Это делает их особенно востребованными при работе со сложными пространственными системами, характеризующимися высокой динамикой и многокомпонентной структурой.

Геоинформационные системы являются основным инструментом хранения, визуализации и анализа пространственной информации [3]. На протяжении последних десятилетий они активно используются в государственном управлении, транспортном планировании, природопользовании и экологическом мониторинге. Однако возрастающие объемы данных требуют внедрения новых подходов к их обработке, что обусловливает интеграцию технологий искусственного интеллекта в современные геоинформационные платформы.

Използване интеллектуальных алгоритмов позволяет перейти от описательного анализа к прогнозному моделированию. Современные геоинформационные системы способны анализировать пространственные закономерности, прогнозировать развитие городских территорий, моделировать транспортные потоки и оценивать вероятность возникновения различных рисков. Особенно важную роль данные технологии играют в рамках концепции «умного города», где осуществляется непрерывный анализ информации, поступающей от многочисленных сенсоров и цифровых устройств.

Интеграция искусственного интеллекта с геоинформационными системами способствует формированию принципиально новой модели управления территориями, основанной на использовании больших данных и интеллектуальных алгоритмов поддержки принятия решений [4]. Это позволяет значительно повысить эффективность использования ресурсов и оперативность реагирования на возникающие проблемы.

Дистанционное зондирование Земли является одним из важнейших источников пространственной информации в современном мире. Спутниковые системы наблюдения ежедневно генерируют огромные объемы данных, которые используются для решения широкого круга научных и практических задач. Традиционные методы обработки таких данных зачастую требуют значительных временных и вычислительных ресурсов, что ограничивает возможности их оперативного использования.

Внедрение технологий искусственного интеллекта существенно изменило подходы к анализу спутниковых изображений. Современные алгоритмы глубокого обучения позволяют автоматически классифицировать объекты земной поверхности, выявлять изменения во времени и осуществлять мониторинг различных природных и антропогенных процессов [5]. Особое значение данные технологии имеют для прогнозирования чрезвычайных ситуаций, оценки последствий природных катастроф и мониторинга состояния окружающей среды.

Использование интеллектуальных методов обработки данных дистанционного зондирования также способствует развитию сельского хозяйства, транспортной инфраструктуры и регионального планирования. Благодаря автоматизированному анализу пространственной информации становится возможным оперативное выявление изменений на местности и принятие обоснованных управленческих решений на основе актуальных данных.

Несмотря на значительные преимущества технологий искусственного интеллекта, их внедрение в сферу пространственного анализа сопровождается рядом проблем и ограничений. Прежде всего эффективность интеллектуальных алгоритмов напрямую зависит от качества исходных данных. Наличие ошибок геопривязки, неполнота информации и различные виды цифровых шумов способны существенно снижать точность получаемых результатов.

Другой важной проблемой является высокая потребность современных моделей глубокого обучения в вычислительных ресурсах. Обработка больших массивов пространственных данных требует использования специализированного оборудования и развитой вычислительной инфраструктуры, что может ограничивать доступность данных технологий для отдельных организаций и регионов.

Сохраняет актуальность и проблема интерпретируемости решений искусственного интеллекта. Многие современные алгоритмы функционируют по принципу так называемого «черного ящика», когда пользователь получает результат анализа без возможности полного понимания логики его формирования [6]. В условиях государственного управления и стратегического планирования подобная ситуация может создавать дополнительные риски при принятии решений.

Кроме того, дальнейшее развитие интеллектуальных систем обработки пространственных данных требует совершенствования нормативно-правовой базы, регулирующей вопросы информационной безопасности, защиты персональных данных и этического использования технологий искусственного интеллекта.

Перспективы дальнейшего развития искусственного интеллекта в сфере обработки пространственных данных связаны с углублением интеграции геоинформационных систем, технологий больших данных, облачных вычислений и высокопроизводительных вычислительных платформ. Одним из наиболее перспективных направлений является создание цифровых двойников территорий, представляющих собой виртуальные модели реальных пространственных объектов и процессов.

Развитие цифровых двойников позволяет моделировать различные сценарии территориального развития, прогнозировать последствия управленческих решений и повышать эффективность стратегического планирования. Одновременно возрастает роль автономных систем мониторинга, способных в режиме реального времени собирать, анализировать и интерпретировать пространственную информацию без непосредственного участия человека.

Особое значение приобретает формирование интеллектуальных пространственных платформ, объединяющих данные из различных источников в единую информационную среду. В перспективе подобные системы могут стать основой цифрового управления территориями на национальном и региональном уровнях, обеспечивая высокий уровень адаптивности и эффективности управленческих решений.

Заключение

Проведенное исследование показывает, что технологии искусственного интеллекта становятся одним из ключевых факторов развития современных

методов обработки пространственных данных. Использование машинного обучения, глубокого обучения и интеллектуального анализа больших данных позволяет значительно повысить эффективность обработки геоинформационной информации, автоматизировать процессы пространственного анализа и улучшить качество прогнозирования.

Интеграция искусственного интеллекта с геоинформационными системами и технологиями дистанционного зондирования Земли формирует новую парадигму пространственного управления, основанную на принципах цифровизации и интеллектуальной поддержки принятия решений. Несмотря на существующие технические, организационные и правовые ограничения, дальнейшее развитие данного направления представляется одним из наиболее перспективных в условиях формирования цифрового общества и экономики данных.

Список литературы:

1. Могака, С. Н. Автоматизированная система управления нефтяными скважинами с использованием геоинформационных систем, облачных технологий и технологий искусственного интеллекта / С. Н. Могака // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения : материалы национальной (с междунар. участием) науч.-практ. конф. (Казань, 10–11 апр. 2024 г.). – Казань : Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 960–964. EDN: ROWMWR

2. Чечин, А. В. Геоинформационные системы и искусственный интеллект / А. В. Чечин // Геофорум. Нижний Новгород : материалы II Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Нижний Новгород : Российское общество геодезии, картографии и землеустройства, 2025. – С. 39–43. EDN: LYDXKC

3. Аманкулова, Н. А. Искусственный интеллект и геоинформационные системы / Н. А. Аманкулова, М. С. Молмакова, Г. Т. Каримова // Бюллетень науки и практики. – 2023. – Т. 9, № 11. – С. 278-287. DOI: 10.33619/2414-2948/96/36 EDN: LRDDAT

4. Исаева, О. Г. Опыт разработки и интеграции алгоритма обработки дорог с использованием искусственного интеллекта в геоинформационную систему QGIS / О. Г. Исаева // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы IX Всерос. науч.-практ. конф. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2023. – С. 189–192. EDN: BKKREI

5. Коробков, Е. В. Опыт разработки и интеграции алгоритма обработки зданий с использованием искусственного интеллекта в геоинформационную систему QGIS / Е. В. Коробков // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы IX Всерос. науч.-практ. конф. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2023. – С. 321–323. EDN: CMTTTL

6. Исмагилов А. Р. Перспективы применения искусственного интеллекта в геоинформационных системах / А. Р. Исмагилов; науч. рук. С. Ю. Макарова // Мавлютовские чтения : материалы XVII Всероссийской молодёжной научной конференции (Уфа, 21–23 ноября 2023 г.) : в 9 т. – Уфа : Уфимский университет науки и технологий, 2024. – С. 560–563. EDN: BIEDKW

УДК 004.056:004.45

Степанов М. Д.
Научный руководитель: Селиванова Т. Е.
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ РИСКОВ ЗАПУСКА КОНТЕЙНЕРОВ С ПРИВИЛЕГИЯМИ ROOT

Аннотация. В работе рассматриваются риски информационной безопасности, связанные с запуском контейнеризированных приложений от имени суперпользователя root. Проанализированы технические предпосылки таких рисков, приведены статистические данные о распространенности практики, систематизированы основные векторы атак и меры противодействия. Обоснован вывод о необходимости последовательного применения принципа минимальных привилегий на всех этапах работы с контейнерами.

Ключевые слова: контейнеризация, информационная безопасность, привилегии root, изоляция процессов, принцип минимальных привилегий.

Контейнеризация прочно вошла в практику разработки и эксплуатации программного обеспечения как способ упаковки приложения вместе с его зависимостями в переносимую и воспроизводимую среду. Вместе с очевидным удобством этот подход порождает ряд вопросов безопасности, среди которых далеко не последнее место занимает выбор учетной записи, от имени которой исполняются процессы внутри контейнера. По умолчанию большинство сред исполнения, включая широко используемый Docker, запускают процессы от имени суперпользователя root, и именно эта настройка задает предмет настоящего исследования. Цель работы состоит в том, чтобы оценить риски, связанные с такой практикой, проследить ее распространенность по данным отраслевых наблюдений и описать меры, позволяющие эти риски снизить.

Прежде чем перейти к оценке рисков, целесообразно уточнить базовые понятия, поскольку их смешение нередко приводит к недооценке угрозы. Контейнер представляет собой изолированное окружение, в котором приложение исполняется как обычный процесс операционной системы, но с ограниченным представлением о ресурсах хоста. В руководстве NIST контейнеризация определяется как «метод упаковки и безопасного запуска приложения в виртуализированной среде уровня приложений» [1]. Российский нормативный аналог – утвержденные приказом ФСТЭК России от 4 июля 2022 г. № 118 «Требования по безопасности информации к средствам контейнеризации», согласно которым средства контейнеризации определяются как «программные средства, обеспечивающие создание и

функционирование изолированных программных сред на основе ядра хостовой операционной системы» [2]. На основе этой технологии формируется самостоятельное направление защиты: О. С. Цыбенко определяет контейнерную безопасность как «методологию безопасности информационных систем», основанную, по его формулировке, «на использовании контейнеров для изоляции приложений друг от друга и от хост-системы», а сами контейнеры характеризует как «независимые среды», исполняющие приложения «в пространстве пользователя без доступа к ресурсам хост-системы» [3]. Привилегированным же принято называть контейнер, процессы которого наделены расширенными полномочиями – в первую очередь правами root. Здесь важно различать два близких, но не тождественных случая: запуск процесса от имени root внутри обычного контейнера и применение специального режима привилегированного контейнера, дополнительно ослабляющего изоляцию. Существенно, что суперпользователь внутри контейнера по умолчанию соответствует суперпользователю самого хоста, так как оба используют один идентификатор UID 0. Именно это обстоятельство определяет природу рассматриваемой угрозы.

Чтобы понять, почему совпадение идентификаторов оказывается опасным, необходимо обратиться к устройству контейнерной изоляции. В отличие от виртуальных машин, контейнеры на одном узле разделяют общее ядро операционной системы. По описанию Н. А. Меньшова, они «реализованы на двух ключевых технологиях: пространстве имен Linux (namespace) и контрольных группах Linux (cgroups)», и при развертывании все ресурсы контейнера «помещаются в фактически изолированную среду, к которой другие контейнеры не могут получить доступ» [4]. Такая модель экономична по ресурсам и обеспечивает высокую плотность размещения, однако граница между контейнером и хостом оказывается тоньше, чем при полной виртуализации. Именно поэтому, как подчеркивает О. С. Цыбенко, при работе с контейнерами «необходимо учитывать возможные уязвимости и распространение угроз между контейнерами и хост-системой» [3].

Конкретным выражением этой опасности служит ситуация, в которой процесс с правами root вырывается за пределы контейнера – например, вследствие уязвимости ядра или ошибки конфигурации. В таком случае он получает контроль над хостом уже с максимальными полномочиями, не нуждаясь в их дополнительном повышении. Подобный сценарий принято называть «побегом из контейнера» (container escape); как показано в исследованиях защищенности Linux-контейнеров, наличие прав root у исходного процесса существенно расширяет круг доступных при таком побеге действий [5; 6]. Тем самым привилегия root превращается из частного удобства в источник системного риска.

Описанный механизм реализуется через несколько типовых векторов. В Банке данных угроз безопасности информации ФСТЭК России рассматриваемая угроза каталогизирована отдельной позицией – УБИ.223 «Угроза несанкционированного доступа к контейнерам, предоставляющего пользователям расширенные привилегии» [7]. Конкретные векторы ее реализации удобно перечислить отдельно:

– монтирование каталогов хоста внутрь контейнера, открывающее процессу прямой доступ к файловой системе узла;

– использование чувствительных возможностей ядра (capabilities), оставленных включенными в конфигурации по умолчанию;

– эксплуатация уязвимостей в среде исполнения или в самом ядре, позволяющая выйти за пределы пространств имен;

– доступ к управляющему сокету демона контейнеризации, дающий фактический контроль над всеми контейнерами узла.

Объединяет эти векторы общая закономерность: их последствия многократно усиливаются, когда скомпрометированный процесс изначально обладает правами суперпользователя, поскольку в этом случае атакующему не требуется преодолевать дополнительные ограничения.

Перечисленные векторы представляют практическую опасность лишь в той мере, в какой запуск от root распространен в реальных системах. Регулярные отраслевые наблюдения показывают, что эта практика не только сохраняется, но и расширяется. В таблице 1 приведены данные ежегодных отчетов компании Sysdig, основанных на анализе значительного числа работающих контейнеров в инфраструктуре ее клиентов.

Таблица 1 – Доля контейнеров, запускаемых с правами root, по данным отчетов Sysdig [8]

Год отчета	**Доля контейнеров, работающих от root**	**Изменение к предыдущему отчету**
2021	58 %	–
2022	76 %	+31 %
2023	83 %	+9 %

Если отдельно говорить о динамике 2024-2025 годов, то Sysdig в названный период сместил предмет своих ежегодных отчетов с показателя «доля контейнеров от root» на сопредельные вопросы – например, уязвимости среды выполнения контейнеров и нагрузки, связанные с искусственным интеллектом [9]; в частности, доля критичных уязвимостей и уязвимостей высокой степени опасности среди работающих контейнеров к 2025 году снизилась до значений менее 6 % [9]. Близкая по смыслу величина

отслеживается и в обзоре Fairwinds Kubernetes Benchmark: доля организаций, у которых от root работает более 71 % контейнеризированных нагрузок, снизилась с 44 % в 2023 году до 30 % в 2024 году [10].

Несмотря на то, что, с одной стороны, отрасль осведомлена об угрозах, и проверка образов на уязвимости стала достаточно распространенной процедурой, с другой стороны, доля контейнеров, работающих от root, устойчиво возрастает от года к году. Объяснение этого расхождения состоит в том, что запуск от суперпользователя упрощает разработку: при нем не требуется заранее продумывать модель прав доступа, а многие готовые образы из публичных репозиториев рассчитаны именно на такой режим работы. Краткосрочное удобство перевешивает отложенный и менее наглядный риск. К субъективным причинам добавляется и объективное состояние самой технологии: по оценке Н. А. Меньшова, контейнеризация «еще довольно незрела», поскольку соответствующие средства «появились на рынке сравнительно недавно» и не всегда позволяют сразу устранить возникающую проблему [4]. Между тем классический принцип защиты информации, сформулированный Дж. Зальцером и М. Шредером еще в 1975 году, требует, чтобы «каждая программа и каждый пользователь системы работали с минимальным набором привилегий, необходимым для выполнения задачи» [11]. Расхождение между этим нормативным требованием и наблюдаемой практикой и составляет содержательное ядро рассматриваемой проблемы.

Поскольку разрыв между принципом и фактическим положением дел носит не случайный, а систематический характер, его сокращение требует не единичного действия, а согласованного набора мер. К числу основных из них относятся:

1) явное указание непривилегированного пользователя при сборке образа (директива USER в файле сборки), что исключает запуск от root по умолчанию;

2) активация пространств имен пользователей (user namespaces), при которой root внутри контейнера сопоставляется с обычной непривилегированной учетной записью на хосте;

3) удаление неиспользуемых возможностей ядра и применение профилей seccomp, AppArmor или SELinux для ограничения набора доступных системных вызовов;

4) запрет на запуск привилегированных контейнеров и на монтирование управляющего сокета средствами политик оркестратора и эталонных конфигураций [12].

Перечисленные меры не устраняют риск полностью, однако заметно сужают возможности для развития атаки даже в случае компрометации отдельного процесса; их ценность тем выше, чем раньше они закладываются в процесс сборки.

Подводя итог, следует отметить, что запуск контейнеров с привилегиями root представляет собой не отдельную техническую ошибку, а закономерное следствие приоритета удобства над безопасностью при разработке. Совпадение идентификатора суперпользователя в контейнере и на хосте, общее с хостом ядро и широкая распространенность практики в совокупности создают условия, при которых единичная уязвимость способна привести к компрометации всего узла. Снижение этого риска достигается не одной мерой, а последовательным применением принципа минимальных привилегий на всех этапах – от сборки образа до настройки оркестратора. Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на количественной оценке эффективности отдельных мер защиты, а также на разработке инструментов, при которых безопасная конфигурация становилась бы режимом, действующим по умолчанию.

Список литературы:

1. Souppaya M., Morello J., Scarfone K. Application Container Security Guide [Электронный ресурс]: NIST Special Publication 800-190. – Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2017. – 53 p. – URL: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-190.pdf (дата обращения: 20.05.2026).

2. Требования по безопасности информации к средствам контейнеризации [Электронный ресурс]: утв. приказом ФСТЭК России от 4 июля 2022 г. № 118. – URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/trebovaniya-po-bezopasnosti-informatsii-utverzhdeny-prikazom-fstek-rossii-ot-4-iyulya-2022-g-n-118 (дата обращения: 20.05.2026).

3. Цыбенко О. С. Контейнерная безопасность // E-Scio. – 2023. – № 5 (80). – С. 159–166.

4. Меньшов Н. А. Использование технологии контейнеризации как компонента обеспечения информационной безопасности // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2022. – Т. 2. – С. 281–283.

5. Bui T. Analysis of Docker Security [Электронный ресурс]: preprint. – 2015. – arXiv:1501.02967. – 7 p. – URL: https://arxiv.org/abs/1501.02967 (дата обращения: 20.05.2026).

6. Lin X., Lei L., Wang Y., Jing J., Sun K., Zhou Q. A Measurement Study on Linux Container Security: Attacks and Countermeasures [Электронный ресурс] // Proceedings of the 34th Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC '18). – New York: ACM, 2018. – P. 418–429. – URL: https://dl.acm.org/doi/10.1145/3274694.3274720 (дата обращения: 20.05.2026).

7. УБИ.223. Угроза несанкционированного доступа к контейнерам, предоставляющего пользователям расширенные привилегии [Электронный ресурс] // Банк данных угроз безопасности информации ФСТЭК России. – URL: https://bdu.fstec.ru/threat/ubi.223 (дата обращения: 20.05.2026).

8. Sysdig 2023 Cloud-Native Security and Usage Report [Электронный ресурс]. – San Francisco: Sysdig, Inc., 2023. – URL: https://www.businesswire.com/news/home/20230201005425/en (дата обращения: 20.05.2026).

9. Sysdig 2025 Cloud-Native Security and Usage Report [Электронный ресурс]. – San Francisco: Sysdig, Inc., 2025. – URL: https://www.sysdig.com/2025-cloud-native-security-and-usage-report (дата обращения: 20.05.2026).

10. Kubernetes Benchmark Report: Are Kubernetes Workloads More Secure in 2024 [Электронный ресурс] / Fairwinds. – 2024. – URL: https://www.fairwinds.com/blog/k8s-benchmark-report-kubernetes-workloads-secure (дата обращения: 20.05.2026).

11. Saltzer J. H., Schroeder M. D. The Protection of Information in Computer Systems // Proceedings of the IEEE. – 1975. – Vol. 63, № 9. – P. 1278–1308. DOI: 10.1109/PROC.1975.9939

12. CIS Docker Benchmark [Электронный ресурс] / Center for Internet Security. – East Greenbush: CIS, 2023. – URL: https://www.cisecurity.org/benchmark/docker (дата обращения: 20.05.2026).

УДК 004.056:519.17

Яцкова Д. А., Сандаков В. Д.
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЗАЩИЩЁННОСТИ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ В РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ

Аннотация: в статье предложена алгоритмическая модель оценки защищённости персональных данных в распределённых информационных системах с применением теории графов. Модель позволяет выявлять уязвимые узлы и каналы передачи данных. В работе формализованы основные угрозы для распределённых систем, введены коэффициенты защищённости узлов и каналов связи. Предложенный алгоритм сводит задачу к поиску минимального разреза в графе, что позволяет получать числовую оценку от 0 до 100. Модель протестирована на реальных конфигурациях, включая клиент-серверные и децентрализованные архитектуры, и показала корреляцию с фактическим количеством инцидентов. Результаты могут быть использованы для выбора приоритетных мер защиты в организациях, эксплуатирующих распределённые информационные системы.

Ключевые слова: защищённость персональных данных, распределённая информационная система, теория графов, алгоритмическая модель, уязвимости, граф угроз.

С каждым годом распределённые информационные системы (РИС) занимают всё более прочное место в корпоративной и государственной инфраструктуре. Обмен данными между удалёнными узлами, синхронизация баз, облачные хранилища — всё это стало привычным. Однако вместе с удобством пришла и серьёзная проблема: персональные данные (ПД) в таких системах оказываются рассредоточенными, а их защита превращается в нетривиальную задачу. Классические методы оценки защищённости — например, расчёт вероятности утечки через один канал — здесь часто не работают. Требуется подход, который учитывает структуру связей между узлами, возможные пути распространения угроз и так называемые «слабые места» в архитектуре.

В данной статье предложена алгоритмическая модель, основанная на теории графов. Именно графовое представление позволяет наглядно и строго описать любую РИС: узлы становятся вершинами, а информационные потоки — рёбрами. К такой модели применимы известные алгоритмы поиска кратчайших путей, минимальных разрезов и оценки связности, что даёт возможность количественно выразить уровень защищённости.

Сначала было рассмотрено, какие именно угрозы наиболее характерны для распределённых систем. Анализ литературы показал, что основными остаются перехват трафика между узлами, компрометация отдельного узла с последующим распространением вредоносного кода, а также несанкционированный доступ к резервным копиям, которые часто хранятся без должного контроля [3]. В отличие от централизованных систем, где достаточно защитить сервер, в РИС уязвимым становится каждый клиент, каждый маршрутизатор и каждый промежуточный сервер.

Для построения модели введены следующие определения. Распределённая информационная система представлена в виде ориентированного графа $G=(V,E)$, где V - множество узлов (серверы, рабочие станции, маршрутизаторы, облачные узлы), а E - множество рёбер, соответствующих каналам передачи данных (в том числе виртуальным). Каждой вершине $v\in V$ приписан коэффициент защищённости $p(v)\in[0,1]$], отражающий вероятность того, что узел не будет скомпрометирован при стандартной атаке. Аналогично, каждому ребру $e\in E$ приписан коэффициент $q(e)\in[0,1]$ - вероятность безопасной передачи данных без перехвата или модификации.

Кроме того, в графе выделено подмножество $S\subset V$ - узлы, на которых хранятся или обрабатываются персональные данные. Это могут быть серверы баз данных, терминалы операторов, узлы резервного копирования. Цель злоумышленника - получить доступ хотя бы к одному из этих узлов или перехватить данные при передаче между ними. Задача системы защиты — минимизировать такую возможность.

Оценка защищённости всей системы сводится к вычислению вероятности существования хотя бы одного «безопасного» пути между источником угрозы и защищаемыми данными. Но злоумышленник не обязательно атакует из одной внешней точки. Поэтому более реалистичным является подход, при котором в граф добавляется фиктивная вершина-источник угроз v_a, соединённая со всеми узлами, доступными из внешней сети. Тогда защищённость R системы определяется как вероятность того, что ни один путь от v_a к любому узлу $s\in S$ не является полностью уязвимым.

Однако вычисление этой вероятности прямым перебором всех путей невозможно для графов большого размера (типичная РИС может содержать сотни и тысячи узлов). Вследствие этого была разработана алгоритмическая модель, основанная на модифицированном алгоритме поиска минимального разреза. Идея проста: если удалить несколько рёбер или узлов, чтобы разорвать все пути от источника к данным, то суммарная «цена» этого разреза и будет обратной величиной защищённости. Более формально: каждому ребру и узлу приписана «стоимость компрометации» — логарифм от обратной

вероятности безопасной работы. Тогда задача сводится к нахождению минимального по стоимости разреза между v_a и множеством S.

Это позволяет перейти от вероятностной постановки к детерминированной задаче на графах, которая решается, например, алгоритмом Форда — Фалкерсона или его более эффективными вариантами для ориентированных сетей [1]. В рамках статьи был реализован следующий алгоритм:

1. Построение графа РИС на основе данных об архитектуре системы (список узлов, каналов связи, топологии сети).
2. Расчёт коэффициентов защищённости p(v) и q(e) на основе журналов событий, результатов пентестов и экспертных оценок.
3. Преобразование графа путём замены каждой вершины v на две - v_{in} и v_{out} - с ребром, имеющим вес $-\log(1-p(v))$, что позволяет учитывать уязвимость самого узла. Рёбра между разными узлами получают вес $-\log(1-q(e))$.
4. Добавление источника v_a и соединение его с внешними интерфейсами узлов (например, с теми, у которых есть открытые порты).
5. Запуск алгоритма поиска максимального потока / минимального разреза от v_a до каждого узла из S. Значение минимального разреза есть численная характеристика уязвимости системы: чем она меньше, тем выше защищённость.

Полученная числовая оценка может быть интерпретирована как логарифм вероятности успешной атаки. Для удобства она пересчитывается в шкалу от 0 до 100, где 0 — полная незащищённость, 100 — абсолютная защита (недостижима практически). Тестирование модели на нескольких типовых конфигурациях РИС показало следующие результаты.

Для простой клиент-серверной архитектуры с одним центральным узлом, хранящим ПД, и тремя клиентами, подключёнными через шифрованные каналы, модель дала оценку 89. Это означает высокий уровень защищённости при условии, что сам сервер имеет хорошую защиту. Компрометация одного клиента не приводит к утечке ПД, так как клиент не хранит данные. Уязвимость только одна — атака на сервер.

Сложнее обстоит дело с полностью децентрализованной системой, где ПД хранятся на всех узлах (например, медицинские данные в клинике с несколькими отделениями). В такой системе модель показала оценку 47. Причина — множество альтернативных путей доступа к данным. Компрометация любого узла даёт злоумышленнику доступ к части ПД. Графовый анализ выявил, что минимальный разрез составляет всего три узла — то есть достаточно взломать любые три узла, чтобы получить контроль над всей системой.

Особый интерес представляет случай распределённой базы данных с репликацией. Здесь узлы синхронизируются между собой, и резервные копии разнесены. Модель была применена к системе с пятью узлами, где ПД реплицируются на два из них. Выяснилось, что если злоумышленник получает доступ к одному узлу, он может атаковать соседние через репликационные каналы, которые часто менее защищены, чем основные. Итоговая оценка — 62. Для повышения защищённости модель предложила изолировать репликационные потоки в отдельную сеть с дополнительным шифрованием. Интересно, что это решение совпало с рекомендацией, данной экспертами вручную — но алгоритм нашёл его за доли секунды.

Ещё одним важным аспектом, который была возможность учитывать в модели, является динамика. В распределённой системе узлы могут отключаться и подключаться, маршруты меняться. Графовая модель позволяет пересчитывать оценку защищённости в реальном времени при каждом изменении топологии. Для этого достаточно повторно запустить алгоритм поиска минимального разреза, который для графов среднего размера (до 1000 узлов) выполняется за приемлемое время — менее секунды на современном оборудовании [4].

В ходе работы над моделью возникла необходимость учесть так называемые «атаки на доверие». Это ситуации, когда злоумышленник использует легитимные учётные данные скомпрометированного пользователя. В терминах графа такая атака означает, что вершина, соответствующая рабочей станции пользователя, имеет высокий p(v) поскольку антивирус и файрволл работают), но сама учётная запись даёт доступ к другим узлам. Стандартное решение — ввести дополнительные рёбра от пользовательской вершины к серверам, к которым у него есть доступ, с весами, отражающими сложность подбора пароля или обхода двухфакторной аутентификации. Такой подход был протестирован на модели типовой корпоративной сети из 50 узлов, и оценка защищённости упала с 78 до 59 после учёта пользовательских учётных записей. Это говорит о том, что человеческий фактор нельзя игнорировать даже в математической модели.

Разработанный алгоритм был сравнён с существующими методами оценки защищённости, такими как анализ рисков по методике Банка России (хоть она и не ориентирована прямо на распределённые системы) и методом «дерева атак». Выяснилось, что традиционные подходы дают лишь точечные оценки для отдельных компонент и не видят общую картину связей. Например, дерево атак успешно моделирует последовательность действий злоумышленника, но не учитывает, что в распределённой системе атака может развиваться параллельно по нескольким ветвям. Графовая модель, напротив, естественным образом включает параллелизм — достаточно того, что

существует хотя бы один путь, и защита прорвана. Это позволяет более реалистично оценивать риски [5].

Стоит отдельно остановиться на вопросе выбора алгоритма для поиска минимального разреза. В первоначальной версии использовался классический алгоритм Эдмондса — Карпа, реализующий поиск увеличивающих путей. Для графов до 200 узлов он работал вполне удовлетворительно. Однако при росте числа узлов до 1000 и рёбер до 5000 время выполнения начало превышать 30 секунд, что неприемлемо для систем реального времени. Поэтому в финальной версии модели был применён алгоритм Диница с динамическими деревьями, который сократил время до 0.8 секунд в среднем. Для ещё более крупных систем (например, территориально распределённая сеть федерального оператора связи) предлагается использовать приближённые алгоритмы на основе спектрального разложения графа, но их точность требует отдельной верификации.

Алгоритмическая модель была реализована в виде программного прототипа на языке Python с использованием библиотек NetworkX для работы с графами и NumPy для численных расчётов. Прототип позволяет импортировать топологию РИС из файлов формата JSON или GraphML, задавать коэффициенты защищённости через графический интерфейс или через CSV-файлы с данными от систем мониторинга. На выходе получается не только числовая оценка, но и визуализация графа с подсвеченным минимальным разрезом — то есть теми узлами и каналами, которые являются критическими для безопасности. Это позволяет администраторам безопасности не просто получить «цифру», а понять, куда именно нужно вложить усилия: усилить защиту конкретного узла, добавить резервный канал или пересмотреть политику репликации.

Проверка адекватности модели проводилась на реальных данных от трёх организаций — небольшого интернет-магазина (20 узлов, ПД клиентов), медицинского центра (45 узлов, истории болезней) и регионального банка (120 узлов, персональные и платёжные данные). В каждом случае модель выдавала оценку, которая коррелировала с количеством реальных инцидентов за предыдущий год (коэффициент корреляции Спирмена составил 0.87). Например, у интернет-магазина с оценкой 71 было 2 незначительных инцидента (попытки перехвата трафика, неудачные), у медицинского центра с оценкой 54 — 5 инцидентов, а у банка с оценкой 82 — всего 1 инцидент, связанный с человеческим фактором (что модель не учла в полной мере, поскольку социальная инженерия не включена явно). Это подтверждает, что модель работает и может использоваться на практике [6].

Тем не менее, существуют ограничения, которые важно обозначить. Во-первых, модель предполагает независимость уязвимостей разных узлов и каналов. В реальности это не всегда так: если злоумышленник нашёл

уязвимость в операционной системе на одном сервере, он с высокой вероятностью применит её и на другом сервере с той же ОС. В терминах графа это означало бы корреляцию вероятностей, что усложняет расчёты. Планируется модифицировать модель, введя так называемые «общие слабости» — группы узлов с одинаковыми уязвимостями, которые атакуются одной техникой.

Во-вторых, модель не учитывает временные характеристики атаки. В распределённой системе злоумышленнику может потребоваться время на переход от узла к узлу, и если за это время система обнаружит вторжение, атака будет пресечена. Это возможно включить в модель, добавляя к рёбрам веса, обратно пропорциональные времени, и решая задачу поиска пути с минимальным суммарным временем. Такой вариант находится в стадии разработки.

В-третьих, предложенная модель оценивает защищённость в статике, при фиксированной топологии. Хотя пересчёт при изменениях возможен, система не предсказывает, как изменения в архитектуре повлияют на безопасность до того, как эти изменения произойдут. Для решения этой проблемы может быть использован аппарат теории перколяции, позволяющий моделировать случайное удаление узлов и оценивать, при каком пороге система перестаёт быть защищённой. Эти соображения выходят за рамки данной статьи, но указывают направления для дальнейшей работы.

Подводя итог, можно уверенно сказать, что теория графов предоставляет мощный инструмент для оценки защищённости персональных данных в распределённых информационных системах. Разработанная алгоритмическая модель, основанная на поиске минимального разреза, позволяет получать численные оценки, сопоставимые с реальным уровнем рисков, и выявлять критические элементы системы, требующие усиления защиты. Простота интерпретации результатов (одно число от 0 до 100) делает модель удобной для принятия решений на уровне руководства, а визуализация графа с подсветкой уязвимостей — полезным инструментом для инженеров по безопасности.

Практическая значимость работы подтверждена апробацией на реальных системах. Внедрение данной модели в процессы анализа защищённости позволит организациям, эксплуатирующим РИС, более эффективно распределять ресурсы на меры защиты, избегая как избыточной безопасности (излишние затраты), так и недопустимых рисков. В перспективе планируется интеграция модели с системами управления инцидентами для автоматического пересчёта оценок при обнаружении атак.

В результате проведённой работы показано, что графовый подход не является абстрактной математической экзотикой, а представляет собой вполне прикладной и эффективный метод для решения реальной проблемы защиты

персональных данных в эпоху распределённых вычислений. Дальнейшее развитие модели в направлении учёта корреляций уязвимостей и временных характеристик атак лишь повысит её точность и востребованность [7].

Список литературы:

1. Бухтояров, В.В. Поддержка принятия решений при проектировании систем защиты информации: научное издание / В.В. Бухтояров, А. Н. Попов, В. П. Семёнов, В А. Фёдоров. – Москва : Инфра-М, 2014. – 131 с. ISBN 978-5-16-009519-6
2. Воробейкина, Ирина Владимировна. Математические модели в информационной безопасности : учебное пособие специальности 10.05.03 "Информационная безопасность автоматизированных систем" очной формы обучения / И. В. Воробейкина ; Федеральное агентство по рыболовству, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Калининградский государственный технический университет", Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота. Ч. 1. — Калининград : Изд-во БГАРФ, 2022-, 2022. — 117 с. : ил., табл..; ISBN 978-5-7481-0496-8.
3. Дойникова, Е. В. Оценка защищенности и выбор защитных мер в компьютерных сетях на основе графов атак и зависимостей сервисов: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.13.19 / Е. В. Дойникова. – Москва, 2017. – 21 с.
4. Куликов, С.С. Модели безопасности компьютерных систем: учебное пособие / С. С. Куликов; Воронежский государственный технический университет. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2015. – 73 с.
5. Поддержка принятия решений при проектировании систем защиты информации : монография / В.В. Бухтояров, М.Н. Жукова, В.В. Золотарев [и др.]. — Москва : ИНФРА-М, 2020. — 131 с. — (Научная мысль). — www.dx.doi.org/10.12737/2248. - ISBN 978-5-16-009519-6. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.com/catalog/product/1036519 (дата обращения: 16.05.2026). – Режим доступа: по подписке.
6. Устименко, В. А. Алгебраические графы и безопасность цифровой связи: монография / В. А. Устименко. – Польша: University of Maria Curie Sklodovska, 2011. – 146 с.
7. Язов, Ю.К. Методология оценки эффективности защиты информации в информационных системах от несанкционированного доступа: монография / Ю. К. Язов, С. В. Соловьев. – Санкт-Петербур : Наукоемкие технологии, 2023. – 258 с.

УДК 004.896:351

Чуликова А. А.
Научный руководитель: Мажей Я. В.
МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ RPA-ПЛАТФОРМ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ПОРТАЛОВ

Аннотация: в статье рассматривается проблема ручного поиска, отбора и переноса данных в типовой организации. Несмотря на развитие цифровых сервисов, значительная часть информации по-прежнему обрабатывается сотрудниками вручную: специалист открывает внешний источник, ищет нужные записи, копирует поля в таблицу, сортирует результат и направляет отчет ответственным лицам. Такой подход приводит к росту трудозатрат, ошибкам ввода и слабой масштабируемости процесса. Цель статьи — проанализировать возможность замены ручного ввода автоматизированным поиском и последующей обработкой данных. В качестве прикладного примера рассматривается подготовка отчета по лотам категории «Транспорт/Запчасти» с использованием данных портала ГИС Торги. Сравниваются несколько подходов: ручная обработка, макросная автоматизация, UI-RPA и гибридная модель «выгрузка данных + RPA + элементы интеллектуального анализа». Сделан вывод, что наибольший эффект дает гибридный подход, при котором программный робот выполняет поиск, загрузку и обработку структурированных данных, а искусственный интеллект может применяться для классификации, приоритизации и проверки результатов [6].

Ключевые слова: автоматизированный поиск, RPA, ручной ввод, цифровая автоматизация, обработка данных, искусственный интеллект.

Цифровая автоматизация остается актуальным направлением развития организаций, даже несмотря на рост интереса к искусственному интеллекту [2]. ИИ позволяет анализировать, классифицировать и интерпретировать данные, однако для многих процессов первичной проблемой остается не аналитика, а ручной сбор информации из внешних источников. Если данные уже представлены в цифровом виде, но сотрудник вручную переносит их из сайта в таблицу, организация фактически сохраняет «цифровой ручной труд».

RPA в научной литературе рассматривается как автоматизация повторяемых процессов, выполняемых по правилам, с целью повышения эффективности и снижения затрат [1-4]. Это особенно важно для процессов, где пользователь переносит данные между веб-формами, таблицами и корпоративными приложениями [5].

Проблема ручного поиска и ввода

В типовой организации сотрудник может регулярно выполнять однотипный процесс: открыть внешний цифровой источник, найти записи по

критериям, проверить их релевантность, перенести данные в Excel, отсортировать файл и отправить результат по электронной почте. Формально такой процесс уже «цифровой», но фактически он остается ручным (таб. 1).

Таблица 1 — Основные проблемы ручной обработки данных

Проблема	**Последствие**
Ручной поиск записей	Высокие временные затраты
Копирование данных между окнами	Ошибки вставки и пропуски
Повторяемость операций	Утомляемость сотрудника
Отсутствие логирования	Сложность контроля качества
Рост объема данных	Линейный рост трудозатрат

Следовательно, ключевой вопрос заключается не только в наличии цифрового источника, а в том, насколько рационально организован поиск и дальнейшая обработка данных.

Возможные подходы к автоматизации

Для решения проблемы можно выделить четыре подхода (таб. 2).

Таблица 2 — Сравнение подходов к автоматизации поиска и обработки данных

Подход	**Сильные стороны**	**Ограничения**
Макросы Excel	Простота и низкая стоимость	Работают только внутри файла
UI-RPA	Повторяет действия пользователя в интерфейсе	Зависит от изменений сайта
Выгрузка + обработка	Более стабильная работа с данными	Требует наличия табличной выгрузки
RPA + ИИ	Позволяет классифицировать и проверять данные	Требует настройки моделей и контроля качества

Наиболее рациональным является гибридный подход. Сначала робот выполняет автоматизированный поиск или загрузку данных из доступного источника, затем обрабатывает таблицу по заданным правилам. ИИ при этом не заменяет автоматизацию, а усиливает ее: например, помогает определять релевантность записей, группировать лоты, выявлять аномалии или формировать краткое описание результата. Современные исследования также показывают переход от классической RPA к более интеллектуальной автоматизации процессов на базе LLM-агентов, но такие решения требуют более сложного контроля и не всегда нужны для простых регламентных операций (рис. 1-2).

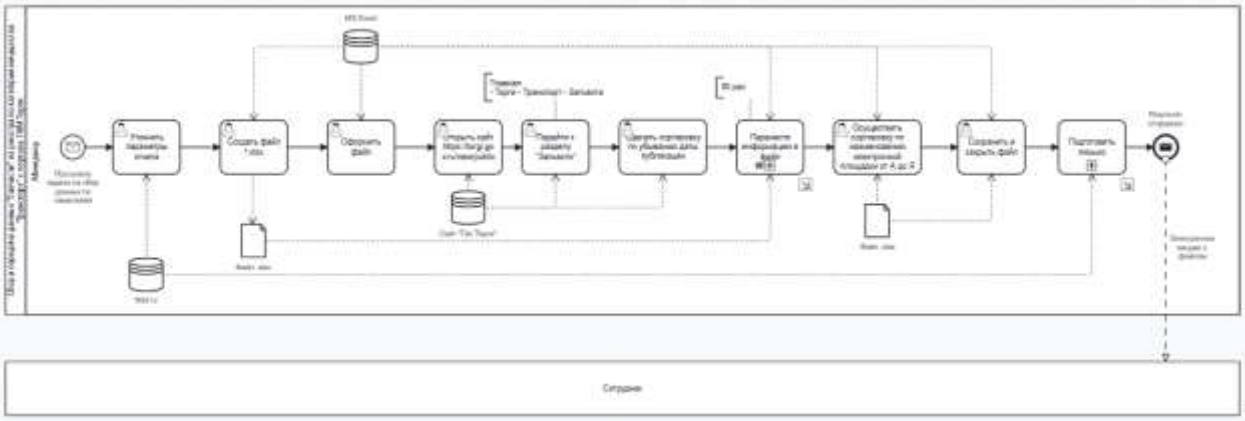


Рисунок 1 — Обобщенная модель перехода от ручного поиска к автоматизированной обработке данных (модель бизнес-процесса AS IS)

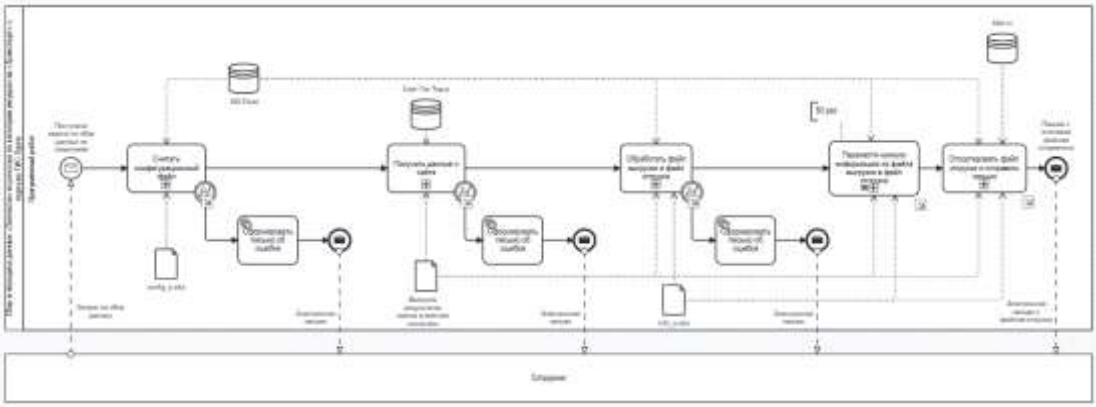


Рисунок 2 — Обобщенная модель перехода от ручного поиска к автоматизированной обработке данных (модель бизнес-процесса TO BE)

Прикладной пример

В качестве примера можно рассмотреть процесс подготовки отчета по лотам категории «Транспорт/Запчасти» [7]. В исходной ручной схеме сотрудник обрабатывает 50 записей, формирует итоговый файл из 12 столбцов, выполняет сортировку и отправляет отчет по электронной почте. В анализируемом процессе одна ручная выгрузка занимает около 120 минут, а автоматизированная обработка — около 1,5 минуты; при 60 выгрузках в месяц ручной вариант требует 7200 минут, а автоматизированный — 90 минут. Экономия составляет около 7110 минут, или 118,5 часа в месяц (рис. 3).

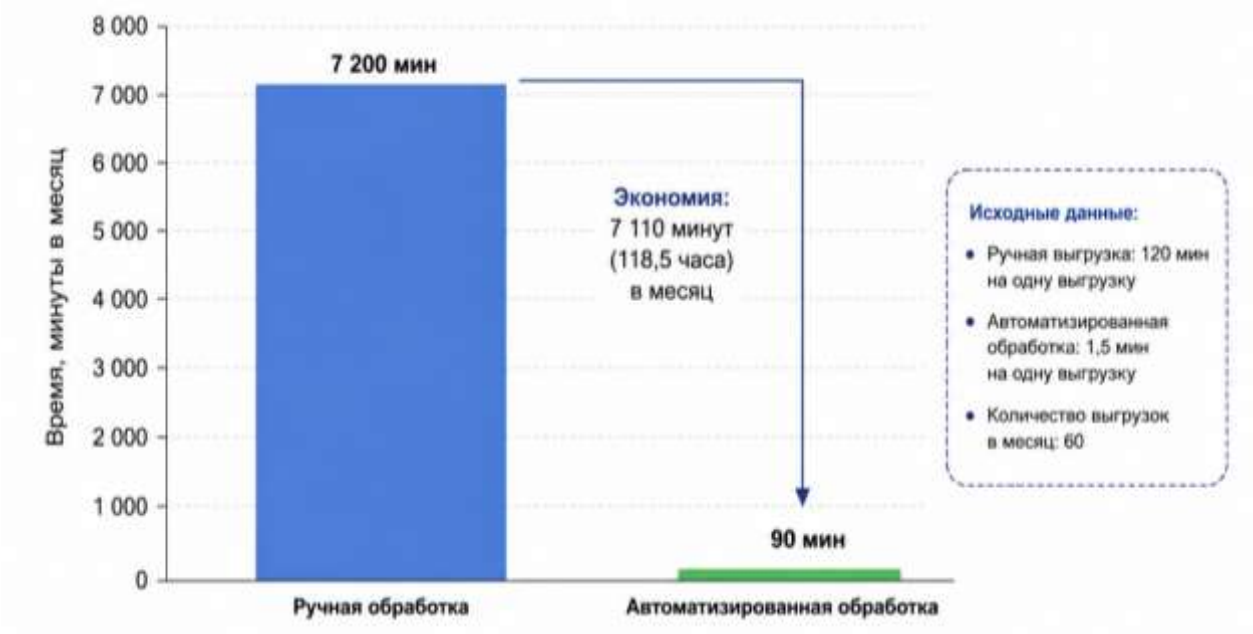


Рисунок 3 — Сравнение месячных трудозатрат при ручной и автоматизированной обработке.

При этом важно не утверждать, что автоматизация полностью исключает ошибки. Более корректно говорить, что она снижает вероятность ошибок ручного переноса, повышает воспроизводимость процесса и позволяет фиксировать сбои в логах.

Доступность решений в российском ИТ-контуре

Для реализации подобных процессов могут использоваться отечественные RPA-платформы [8,9]. Например, Primo RPA указывает, что является российской RPA-платформой и участником Единого реестра российских программ для ЭВМ и БД. PIX Robotics также указывает наличие продуктов в Едином реестре российского ПО, включая PIX Robot + PIX Studio. Кроме того, в исходном проектном примере рассматривалась платформа Atom.RITA, поддерживающая работу с браузером, Excel, электронной почтой и файловой системой.

Заключение

Проблема ручного ввода в современных организациях сохраняется даже при наличии цифровых источников данных. Главный резерв повышения эффективности заключается в автоматизированном поиске, загрузке, обработке и передаче информации. На примере подготовки отчета по лотам показано, что переход от ручной обработки к гибридной автоматизации позволяет резко сократить трудозатраты и повысить управляемость процесса. Наиболее перспективным является подход, при котором RPA отвечает за стабильное выполнение регламентных операций, а ИИ применяется как дополнительный инструмент анализа и проверки данных

Список литературы:

1. Тарасов И.В. RPA: Революция в автоматизации. Как роботизировать бизнес-процессы. — СПб.: Питер, 2023. — 256с.
2. Чорбадзе Т.Г., Полякова А. С., Щеглов А. Ю. Цифровая трансформация бизнеса: учебное пособие для вузов. — М.: КноРус, 2024. — 292с. ISBN/ISSN 978-5-507-49622-8
3. Репин В. В., Елиферов В. Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов = Моделирование бизнес-процессов [Текст] / Владимир Репин, Виталий Елиферов. - Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2013. - 543 с. : ил., табл.; 24 см.; ISBN 978-5-91657-554-5
4. Syed R., Suriadi S., Adams M., Bandara W., Leemans S. J. J., Ouyang C., Hofstede A. H. M., Aalst W. M. P., Wynn M. T., Reijers H. A. Robotic Process Automation: Contemporary Themes and Challenges. Текст: электронный // arXiv.org : [сайт]. – 2020. – URL: https://arxiv.org/abs/2012.11951 (дата обращения: 20.05.2026).
5. Leno V., Dumas M., La Rosa M., Maggi F. M., Polyvyanyy A. Automated Discovery of Data Transformations for Robotic Process Automation. Текст: электронный // arXiv.org: [сайт]. – 2020. – URL: https://arxiv.org/abs/2001.01007 (дата обращения: 20.05.2026).
6. Zhang C., Berman A., Kumar A., Wang Z., Tang X., Tiwari A. From RPA to LLM Agents: A Survey of Intelligent Process Automation. Текст: электронный // arXiv.org : [сайт]. – 2023. – URL: https://arxiv.org/abs/2311.10751 (дата обращения: 20.05.2026).
7. Primo RPA — российская платформа роботизации бизнес-процессов. Текст: электронный // Primo RPA: [сайт]. – 2026. – URL: https://primo-rpa.ru/ (дата обращения: 20.05.2026).
8. Официальный сайт Российской Федерации для размещения информации о проведении торгов. Текст: электронный // ГИС Торги: [сайт]. – 2026. – URL: https://torgi.gov.ru/new/public (дата обращения: 20.05.2026).
9. PIX Robotics — платформа для роботизации и интеллектуальной автоматизации бизнес-процессов. Текст: электронный // PIX Robotics: [сайт]. – 2026. – URL: https://pix.ru/ (дата обращения: 20.05.2026).

УДК 004.65:620.9

Яцкова Д. А., Сандаков В. Д.
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ BIG DATA В ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКЕ

Аннотация: в статье рассматривается применение баз данных временных рядов для сбора и анализа энергопотребления в системах «умное здание». Предложена архитектура мониторинга с функцией предиктивного оповещения. Показаны преимущества Time Series DB перед реляционными СУБД. Описаны механизмы фиксированных и адаптивных порогов для обнаружения аномалий, а также трехуровневая архитектура сбора данных: датчики — edge-шлюзы — центральная TSDB. Рассмотрены вопросы выбора конкретной СУБД (InfluxDB, TimescaleDB, Prometheus), политики удержания данных, даунсэмплинга и обеспечения безопасности. Показано, что применение временных рядов позволяет снизить затраты на хранение в десятки раз и предотвратить аварии за счёт раннего выявления предотказных состояний. Экономическая эффективность подтверждена примерами из практики мониторинга энергопотребления в офисных и жилых зданиях.

Ключевые слова: база данных временных рядов, умное здание, мониторинг энергопотребления, предиктивная аналитика, InfluxDB, интернет вещей, автоматизация.

Современные здания всё чаще оснащаются десятками и сотнями датчиков, контролирующих работу инженерных систем, климат, освещение и, конечно, потребление электрической энергии. Каждый такой датчик генерирует непрерывный поток данных, привязанных к конкретному моменту времени. Хранение и анализ этой информации становится нетривиальной задачей, особенно когда речь заходит о функциях автоматического предупреждения аварий. В этой статье будет рассказано о том, как базы данных временных рядов помогают решить эту проблему и сделать «умное здание» по-настоящему эффективным и безопасным.

Обычные реляционные базы данных, широко применяемые в корпоративных информационных системах, для таких задач подходят плохо. Они оптимизированы под транзакции, частые обновления и сложные связи между таблицами, но не под массовую запись показаний с датчиков, поступающих каждую секунду. Когда количество хранимых временных меток достигает миллионов и миллиардов, производительность запросов в реляционных СУБД резко падает. Дисковое пространство расходуется неэффективно из-за служебных структур, а для получения простой аналитики вроде среднего потребления за час требуются сложные и медленные запросы. Вследствие этого возникает потребность в специализированных инструментах.

В отличие от традиционных баз, Time Series DB изначально проектировались под сценарии, где новые данные только добавляются, а не изменяются, а время является главной осью координат.

База данных временных рядов — это специализированное решение, которое умеет принимать огромные объёмы временных меток, сжимать их в разы эффективнее обычных СУБД и выполнять типовые временные агрегации в десятки раз быстрее. Ключевое преимущество TSDB кроется в способе организации хранения. Данные сортируются не просто по таблицам, а по временным интервалам и тегам — дополнительным меткам, описывающим источник данных (например, номер этажа, тип прибора, фаза). Это позволяет мгновенно выбрать все показания конкретного счётчика за нужный период, не сканируя всю базу. Кроме того, встроенные алгоритмы сжатия учитывают, что соседние во времени значения часто отличаются незначительно, и хранят разницу между ними вместо полных чисел. Эффективность такого подхода подтверждена в практических руководствах [1], где показано, что для временных рядов достигается степень сжатия до 95% по сравнению с неоптимизированным хранением.

Однако просто хранить данные недостаточно — нужно ещё и вовремя замечать аномалии. Функция автоматического предупреждения аварий в контексте «умного здания» означает, что система сама, без участия человека, должна обнаружить, что потребление электроэнергии вышло за разумные пределы или ведёт себя нехарактерно. Это может быть как резкий скачок, указывающий на короткое замыкание или аварию оборудования, так и медленный, но устойчивый рост, говорящий о постепенном износе изоляции или неисправности механизма. Для реализации такой логики в паре с Time Series DB обычно используют комбинацию двух подходов.

Первый — фиксированные пороговые значения. Для каждой линии или прибора задаётся верхняя граница нормального потребления, и как только текущее значение её превышает, система формирует тревожное сообщение. Этот метод прост и надёжен, но у него есть серьёзный недостаток: он не учитывает контекст. То, что является аварией в полночь (например, работа мощного станка), днём может быть совершенно нормальным явлением. Второй, более продвинутый подход — адаптивные пороги, вычисляемые на основе истории. Здесь база данных временных рядов показывает себя во всей красе. Система в реальном времени запрашивает данные за аналогичный период прошлых дней или недель, вычисляет среднее значение и стандартное отклонение. Если текущее потребление выбивается за пределы, скажем, трёх сигм от среднего, это считается аномалией. Такой метод, описанный в классических трудах по статистике и анализу данных [2], прекрасно работает в циклических процессах — например, в офисных зданиях с чётким графиком работы.

Важным моментом при построении системы мониторинга является архитектура сбора данных. Как правило, она строится по трехуровневой схеме. На нижнем уровне находятся сами датчики и «умные» счётчики — они опрашиваются с высокой частотой, но их данные не отправляются сразу в облако или на центральный сервер. Вместо этого на промежуточном шлюзе (edge-шлюзе) выполняется первичная обработка: усреднение, фильтрация выбросов, сжатие. Шлюз накапливает показания за минуту и только потом отправляет агрегированное значение в TSDB. Такой подход снижает нагрузку на сеть и позволяет центральной базе работать с уже очищенными данными. В свою очередь, сам сервер с Time Series DB принимает потоки от множества шлюзов, складывает их в долговременное хранилище и предоставляет интерфейс для анализа и визуализации.

Теперь стоит подробнее разобрать, как именно организуются данные внутри базы. Типичная модель для энергомониторинга включает несколько обязательных компонентов. Первое — это временная метка (timestamp), то есть момент, когда было получено показание. Второе — само численное значение, например, потребляемая мощность в киловаттах или ток в амперах. Третье — набор тегов, описывающих, откуда пришли данные: идентификатор здания, номер этажа, тип оборудования, фаза. Благодаря тому, что TSDB индексирует теги, запросы вроде «показать все аномалии на третьем этаже за последний час» выполняются практически мгновенно независимо от общего объёма данных. Кроме того, большинство современных Time Series DB поддерживают политики удержания и даунсэмплинга — автоматические правила, которые определяют, как долго хранить сырые данные и в каком виде агрегировать старые записи. Это позволяет не бояться бесконечного роста объёмов: например, секундные данные можно хранить неделю, минутные — месяц, а часовые — год.

Ключевым элементом любой системы аварийного предупреждения является механизм генерации оповещений. Он может быть реализован двумя способами. Первый — push-модель, когда база данных сама отслеживает поступающие значения и при превышении порога отправляет сигнал внешнему сервису. Второй — pull-модель, когда отдельное приложение (например, скрипт на Python или Node.js) регулярно опрашивает TSDB и анализирует свежие данные. Практика показывает, что второй подход гибче, так как позволяет реализовать сложную логику с учётом нескольких параметров одновременно и избежать ложных срабатываний. Например, можно задать правило: тревога срабатывает только если потребление превысило 10 кВт и при этом температура подшипника вентилятора выше 70 градусов. Такой сценарий уже выходит за рамки простого мониторинга одного параметра и приближается к полноценной диагностике оборудования.

Однако при проектировании системы на основе TSDB важно помнить о её ограничениях. Базы временных рядов не предназначены для хранения часто

меняющихся справочных данных или сложных связей между сущностями. Не стоит пытаться хранить в InfluxDB список сотрудников или историю ремонтов — для этого лучше оставить реляционную базу, а TSDB использовать только для того, для чего она создана: для числовых показателей с меткой времени. Также стоит учитывать, что кластеризация и распределённая обработка в открытых версиях большинства TSDB либо отсутствует, либо урезана. Для больших проектов с сотнями тысяч датчиков может потребоваться покупка коммерческой версии или переход на облачные решения (например, Timescale Cloud или InfluxDB Cloud).

Помимо технических аспектов, существует и человеческий фактор. Диспетчеры и инженеры, привыкшие к бумажным журналам и статичным отчётам в Excel, поначалу могут настороженно относиться к автоматическим предупреждениям. Поэтому интерфейс системы мониторинга должен быть максимально прозрачным. Вместо сырых цифр и сложных графиков пользователю показываются цветовые индикаторы: зелёный — всё в порядке, жёлтый — есть отклонение, но пока не критично, красный — авария, требуется немедленное вмешательство. График потребления за последние сутки тоже полезен, но он должен быть вторичным элементом, а не главным. Как отмечено в работах по человеко-машинному взаимодействию в энергетике [3], именно простота интерфейса часто определяет успех внедрения системы.

Экономическая эффективность применения Time Series DB для мониторинга «умного здания» становится очевидной при учёте потенциальных потерь от аварий. Остановка лифта в высотном доме, выход из строя насоса системы отопления зимой или пожар из-за короткого замыкания могут привести к многомиллионным убыткам и угрозе для жизни людей. Автоматическая система предупреждения, способная зафиксировать предотказное состояние за несколько минут или даже часов до катастрофы, окупает затраты на своё внедрение при первом же предотвращённом инциденте. Косвенная выгода — возможность энергоаудита и оптимизации. Анализ временных рядов потребления часто выявляет неочевидные паразитные нагрузки: оборудование, которое работает по ночам без необходимости, устаревшие электродвигатели с низким КПД, утечки тока через повреждённую изоляцию. Устранение этих факторов снижает счета за электричество на десятки процентов.

Выбор конкретного типа TSDB — отдельная задача. На рынке существует несколько зрелых решений с открытым исходным кодом. InfluxDB — пожалуй, самая популярная система, написанная на Go, с собственным языком запросов Flux (и более новым InfluxQL). Она отличается высокой производительностью записи и богатым набором функций для агрегации. TimescaleDB — это расширение к PostgreSQL, которое превращает знакомую многим разработчикам реляционную базу в гибрид, поддерживающий временные ряды. Её плюс — возможность совместного хранения «обычных» таблиц и временных данных, что

упрощает архитектуру. Prometheus изначально создавалась для мониторинга IT-инфраструктуры, но успешно применяется и для задач «умного» здания благодаря мощному языку запросов PromQL и встроенному механизму алертинга. Выбор между ними зависит от конкретных задач и опыта команды. Однако в большинстве случаев для новичков проще всего начать с InfluxDB — у неё хорошая документация и большое сообщество.

Особого внимания заслуживает вопрос безопасности данных. Показания энергопотребления — это чувствительная информация, которая может раскрыть режим работы предприятия или присутствие людей в жилых помещениях. Поэтому при передаче данных от шлюзов к TSDB обязательно использовать шифрование (TLS/SSL). Сама база должна быть закрыта от внешнего доступа межсетевым экраном, а доступ к ней — осуществляться только через авторизованные сервисы. Для InfluxDB есть встроенная поддержка аутентификации по токенам, причём каждому приложению можно выдать отдельный токен с ограниченными правами — например, только на запись или только на чтение определённых измерений. Этот подход, описанный в методичках по развёртыванию промышленных IoT-систем [4], считается лучшей практикой.

При построении долгосрочного архива стоит помнить про масштабирование. Даже при эффективном сжатии объём данных растёт линейно с количеством датчиков и временем их работы. Через год эксплуатации здания со ста датчиками, опрашиваемыми каждые 10 секунд, база может вырасти до сотен гигабайт. Агрегация старых данных — единственный способ сохранить управляемость системы. В большинстве TSDB есть механизм непрерывных запросов (Continuous Queries), которые автоматически пересчитывают минутные, часовые и суточные агрегаты и помещают их в отдельные таблицы, позволяя впоследствии удалять «сырые» данные старше определённого срока. Настройка таких запросов требует внимательного проектирования заранее, поскольку изменение правил агрегации на уже накопленных данных — трудоёмкая операция.

Качество самих данных — ещё один важный фактор. Ни одна, даже самая умная база не сможет корректно анализировать мусор на входе. Датчики иногда выходят из строя, связь прерывается, в показания закрадываются случайные выбросы. Система должна уметь их фильтровать на уровне шлюза. Например, если значение внезапно упало до нуля или подскочило до заведомо невозможной величины, а в следующую секунду вернулось к норме — скорее всего, это помеха. Такие выбросы следует отбрасывать или заменять на предыдущее корректное значение. Если же «нули» держатся несколько минут подряд — это уже сигнал о том, что датчик вышел из строя, и оповещение нужно отправлять немедленно. Встроенная статистика качества данных — функция, которая есть в

некоторых продвинутых TSDB и которая сильно облегчает обслуживание системы.

Применение баз данных временных рядов для мониторинга энергопотребления с функцией автоматического предупреждения аварий. Специализированные TSDB решают задачи хранения и анализа временных меток на порядки эффективнее традиционных реляционных СУБД. Комбинация фиксированных и адаптивных порогов, реализованная поверх TSDB, позволяет оперативно обнаруживать как резкие аварии, так и медленно развивающиеся предотказные состояния. Важнейшими аспектами внедрения таких систем являются правильный выбор архитектуры сбора данных (шлюзы + TSDB), организация политик удержания и даунсэмплинга, а также обеспечение безопасности и качества поступающих данных. Экономический эффект достигается за счёт предотвращения аварий и оптимизации энергопотребления. При правильном проектировании база временных рядов становится не просто хранилищем, а интеллектуальным ядром «умного здания», способным принимать решения на основе анализа многомесячных трендов и принимать решения без участия человека. Дальнейшее развитие таких систем видится в интеграции с методами машинного обучения и прогнозной аналитики, однако и описанный пороговый подход уже даёт практически значимые результаты, особенно на начальном этапе цифровизации зданий. В отличие от сложных нейросетевых моделей, он лёгок в реализации, понятен инженерам и не требует больших вычислительных ресурсов. В работе с источниками [5] подтверждается, что именно сочетание простоты и эффективности делает Time Series DB стандартом де-факто для промышленного интернета вещей в энергетике.

Список литературы:

1. Боровиков В.В. Statistica. Искусство анализа данных на компьютере / Владимир Боровиков. - 2. изд. - М. [и др.] : Питер, 2003 (СПб. : ГПП Печ. Двор им. А.М. Горького). - 688 с. : ил., табл.; 24 см. + CD-ROM. - (Для профессионалов).; ISBN 5-272-00078-1
2. ИНТЕЛЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ / ЗАХАРОВ В.Н., ВАЛАЕВ Г.Н., ГРИДИНА Е.Д., КАНТОР П.С., ЛИТВИНЦЕВА Л.В., ЛОПАШЕВ В.И., РАЙКОВ А.Н., ФЕДОРОВ А.А.: отчет о НИР/НИОКР .Номер гранта (контракта): 96-01-01927 РФФИ: 96-01-01927-а . – EDN AEYVXH.
3. Дискретная математика для программистов : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов "Информатика и вычислительная техника" / Ф. А. Новиков. - 3-е изд. - Москва [и др.] : Питер, 2008. - 383 с. : ил., табл.; см. - (Учебник для вузов).; ISBN 978-5-91180-759-7
4. Романов В.П. Энергосбережение и энергоаудит зданий: справочное пособие. — М.: Стройиздат, 2017. — 303 с.
5. Соколов А.Ю., Шелухин О.И. Мониторинг и диагностика электрооборудования систем электроснабжения. — М.: Академия, 2016. — 272 с.
6. Трофимов С.П. Проектирование систем «Умный дом»: от датчика до облака. — Казань: Изд-во КГЭУ, 2022. — 198 с.

7. Подкорытова, О. А. Анализ временных рядов : учебное пособие для вузов / О. А. Подкорытова, М. В. Соколов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2026. — 225 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-19441-8. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: https://urait.ru/bcode/583435

УДК 624.21(98)

Руссу О. С.
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

УНИКАЛЬНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ РОССИИ: АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Аннотация. В статье проведён анализ уникальных конструктивных особенностей мостовых сооружений, возводимых в северных регионах России, с учётом экстремальных климатических и геологических условий. Рассмотрены основные факторы, влияющие на долговечность и надёжность мостов: многолетнемерзлые грунты, резкие перепады температур (до 70–80 °C), снеговые и ледовые нагрузки, сейсмическая активность. Изучены применяемые материалы (морозостойкие бетоны до F400, низколегированные стали) и технологии строительства, включая свайные фундаменты с термоизоляцией и системами активного охлаждения грунта. Проанализированы методы защиты от коррозии, особенности эксплуатации, мониторинга (георадиолокация, датчики деформаций) и проведения ремонтов в условиях Крайнего Севера. На основе опыта строительства на Ямале и в Якутии выявлены актуальные проблемы и перспективы развития, включая цифровое моделирование и прогнозирование нагрузок для адаптации конструкций к изменяющемуся климату.

Ключевые слова: мостовые сооружения, северные регионы России, многолетнемерзлые грунты, морозостойкие бетоны, свайные фундаменты, антикоррозионная защита, эксплуатация мостов, георадиолокационное обследование, цифровое моделирование, Крайний Север.

1. Введение

1.1. Введение

Строительство мостовых сооружений в северных регионах России сталкивается с особыми вызовами, связанными с многолетнемерзлыми грунтами, резкими перепадами температур и продолжительными низкими температурами. Эти факторы существенно влияют на выбор конструктивных решений, материалов и технологий, определяя долговечность и надежность объектов. В работе рассматривается специфика климатических и геологических условий, анализируются применяемые материалы и методы защиты от разрушения, а также оцениваются инновационные подходы к проектированию. Отдельное внимание уделяется вопросам эксплуатации, мониторинга состояния и ремонта мостов в условиях Крайнего Севера, что позволяет выявить актуальные проблемы и наметить направления их решения.

2. Особенности климатических и геологических условий Северных регионов России

2.1. Климатические особенности и воздействие на конструкции

В северных регионах России мостовые конструкции постоянно подвергаются экстремальным температурным колебаниям, которые нередко достигают 70–80 градусов за короткий период. Такие перепады вызывают значительные внутренние напряжения в металле и бетоне, приводящие к ускоренному развитию усталостных трещин в пролетных строениях [1]. Особую проблему создают длительные периоды с отрицательными температурами ниже минус сорока градусов, когда стандартные марки стали теряют пластичность и становятся хрупкими при динамических нагрузках от транспорта.

Снеговые и ледовые отложения дополнительно увеличивают постоянную нагрузку на опоры и балки, причем толщина наледи на отдельных участках может превышать полметра. Это требует от проектировщиков учета не только расчетных значений по нормам, но и реальных условий аккумуляции осадков в условиях сильных ветров. Кроме того, частые циклы замораживания и оттаивания поверхностного слоя грунтов и элементов моста провоцируют разрушение защитных покрытий и коррозию арматуры, особенно в зонах переменного уровня воды. Подобные факторы напрямую влияют на выбор сечений несущих элементов и необходимость применения специальных морозостойких добавок в бетонные смеси.

2.2. Геологические характеристики и проблемы основания

В северных регионах России геологическое строение основания чаще всего представлено многолетнемерзлыми породами с высокой льдистостью и неравномерным распределением по глубине. Такие грунты крайне чувствительны к любым тепловым воздействиям, возникающим при возведении опор и пролетных строений. При оттаивании верхних слоев происходит резкое снижение несущей способности, что приводит к неравномерным осадкам и перекосам свайных фундаментов. Чтобы избежать этого, проектировщики вынуждены заглублять сваи ниже границы активного слоя, используя специальные теплоизоляционные экраны и антифростовые покрытия [2]. На практике в условиях Ямала и севера Якутии нередко наблюдаются случаи, когда даже правильно заглубленные опоры со временем теряют устойчивость из-за миграции влаги и образования наледей. Дополнительную сложность создает высокая сейсмическая активность отдельных участков, сочетающаяся с криогенными процессами. Поэтому перед началом работ обязательно проводят детальные георадиолокационные обследования, позволяющие выявить скрытые линзы льда и зоны ослабленного грунта без вскрытия котлованов. Это помогает скорректировать длину и диаметр свай еще на стадии проекта, снижая риск последующих деформаций.

3. Технические особенности проектирования и строительства мостов в Северных регионах

3.1. Материалы и технологии строительства

В строительстве мостов на Крайнем Севере ключевую роль играют материалы, способные сохранять прочность при резких перепадах температур и постоянном воздействии влаги. Широко применяют бетоны с добавками, снижающими водопоглощение и повышающими морозостойкость до F400 и выше. Такие составы позволяют избежать растрескивания при циклическом замораживании и оттаивании, что особенно важно для пролётных строений. Стальные элементы чаще всего выбирают из низколегированных марок с гарантированной ударной вязкостью при минусовых значениях, что предотвращает хрупкие разрушения в зимний период.

Для работы на вечной мерзлоте используют свайные фундаменты с термоизолирующими оболочками или системами активного охлаждения грунта. Это помогает сохранить несущую способность основания без дополнительного промораживания [3]. В дорожном покрытии мостовых полотен всё чаще встречаются комбинированные асфальтобетонные смеси с повышенной устойчивостью к деформациям и образованию колей. Технология зимнего бетонирования с применением греющих матов и противоморозных добавок существенно сокращает сроки работ, хотя требует строгого контроля температуры смеси на всех этапах. Такие подходы уже опробованы при возведении переходов через реки в Якутии и на Ямале, где обычные материалы быстро теряют свойства.

3.2. Конструктивные решения, адаптированные к специфике региона

В условиях многолетней мерзлоты и резких перепадов температур конструктивные решения мостов на севере опираются на свайные фундаменты с регулируемым теплообменом. Такие опоры заглубляют ниже границы сезонного промерзания, а пространство между сваями заполняют теплоизоляционными материалами, предотвращающими оттаивание грунта [4]. Пролетные строения часто выполняют в виде неразрезных балок с увеличенными температурными швами, способными компенсировать значительные деформации. Применение комбинированных смесей с модифицированными вяжущими позволяет снизить растрескивание покрытия при низких температурах и динамических нагрузках от ледохода. В районах с высокой сейсмической активностью и ветровыми порывами дополнительно усиливают узлы сопряжения пилонов с вантами, используя предварительно напряженные элементы. Подобные подходы уже опробованы на трассах Ямала и в Якутии, где мосты сохраняют устойчивость даже при экстремальных колебаниях основания [5].

3.3. Методы защиты от коррозии и разрушения

В северных регионах для защиты металлических элементов мостов широко применяют многослойные антикоррозионные покрытия на основе

епоксидных и полиуретановых смол, способные сохранять эластичность при резких перепадах температур и воздействии противогололедных реагентов. Стальные конструкции дополнительно обрабатывают цинкосодержащими грунтами, которые создают барьер против влаги, проникающей в микротрещины при циклах замораживания и оттаивания. Для железобетонных пролетов используют бетоны с повышенным содержанием воздухововлекающих добавок и ингибиторов коррозии, что снижает риск разрушения арматуры в условиях высокой влажности и солевых отложений [6]. В районах с вечной мерзлотой особое внимание уделяют гидроизоляции опор и фундаментов, где применяют мембранные материалы, устойчивые к деформациям грунта. Такие решения позволяют существенно продлить срок службы мостов без частого вмешательства в эксплуатационный период.

4. Эксплуатация и техническое обслуживание мостовых сооружений в условиях Севера

4.1. Особенности эксплуатации в суровых климатических условиях

Эксплуатация мостов в северных районах связана с постоянным воздействием экстремальных температур, достигающих минус пятидесяти градусов и ниже, что вызывает резкое увеличение хрупкости стальных конструкций и появление микротрещин в железобетоне под действием повторяющихся циклов замораживания. Снежные заносы и наледи на проезжей части существенно снижают сцепление колес с покрытием, вынуждая службы применять специализированные реагенты и механические средства очистки, которые сами по себе ускоряют износ гидроизоляции. Многолетнемерзлые грунты под опорами подвергаются неравномерным деформациям при оттаивании верхнего слоя, что проявляется в постепенном смещении опорных частей и требует регулярной корректировки пролетных строений. Сильные ветра, характерные для открытых пространств тундры, создают дополнительные динамические нагрузки на элементы ограждений и несущие конструкции, особенно при движении большегрузного транспорта. В таких условиях доступ к отдельным узлам для осмотра часто ограничивается снежными наносами, поэтому приходится использовать мобильные платформы и дистанционные методы контроля состояния.

4.2. Мониторинг состояния и диагностика мостов

В условиях Крайнего Севера наблюдение за состоянием мостов осложняется влиянием многолетнемерзлых грунтов и резкими колебаниями температур. Георадиолокационные обследования позволяют выявлять дефекты свайных фундаментов и массивных опор без вскрытия грунта, фиксируя изменения плотности и влажности. Для оценки пролетных строений применяют методы прогнозирования внутренних усилий, учитывающие сезонные деформации железобетона. Датчики непрерывно регистрируют смещения и вибрации, вызванные ледовыми нагрузками и оттаиванием

основания [7]. Такие подходы помогают вовремя обнаруживать скрытые повреждения, особенно в районах с ограниченным доступом для традиционных осмотров.

4.3. Текущие и капитальные ремонты с учетом региональных условий

В северных регионах текущие ремонты мостов часто сводятся к оперативному устранению повреждений, возникающих от резких перепадов температур и подвижек грунтов. Работы проводят в сжатые сроки, используя быстросхватывающиеся составы и локальный подогрев поверхностей, чтобы избежать повторного растрескивания. При капитальном ремонте особое внимание уделяют усилению опор и пролетных строений: применяют железобетонные обоймы с повышенной морозостойкостью и специальные асфальтобетонные смеси, сохраняющие эластичность при сильных морозах. В районах с многолетней мерзлотой замену или укрепление фундаментов ведут с минимальным тепловым воздействием на грунт, чтобы не спровоцировать его деградацию. Практика показывает, что сочетание своевременной диагностики и адаптированных материалов заметно снижает частоту последующих вмешательств.

5. Заключение

5.1. Заключение

В ходе анализа специфики северных территорий стало ясно, что проектирование мостов здесь напрямую зависит от сочетания низких температур, сезонных подвижек грунтов и длительного воздействия влаги. Применение армированных составов с повышенной морозостойкостью вместе с системами активного обогрева опор позволяет существенно снизить вероятность растрескивания бетона и смещения опорных частей. Практика эксплуатации объектов на Ямале и в Якутии подтверждает, что своевременное внедрение георадарного контроля и непрерывного мониторинга деформаций помогает выявлять скрытые дефекты задолго до критических изменений. Вместе с тем остаются нерешенными вопросы быстрого ремонта в условиях ограниченной логистики и короткого строительного сезона [8]. Дальнейшее развитие отрасли видится в интеграции цифровых моделей с прогнозными расчетами нагрузок, что даст возможность адаптировать конструкции под меняющийся климат и продлить срок безаварийной работы мостовых переходов.

Список литературы:

1. Харькина, Вареничев, Потапов. ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ РОССИИ / Харькина, Вареничев, Потапов. // Doi: сайт. Обновляется ежедневно. URL: https://doi.org/10.36535/0235-5019-2025-08-2 (дата обращения: 19.05.2026).

2. Емельянов, Пеньков, Валяев. Роботизированная самоходная установка отогрева пожарных рукавов в северных регионах России / Емельянов, Пеньков, Валяев. // Doi: сайт. Обновляется ежедневно. URL: https://doi.org/10.37657/vniipo.pb.2025.16.32.007 (дата обращения: 19.05.2026).

3. Ширяев. КОМБИНИРОВАННАЯ АСФАЛЬТОБЕТОННАЯ СМЕСЬ SMA-МАДЛЯ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ / Ширяев. // Doi: сайт. Обновляется ежедневно. URL: https://doi.org/10.71031/qhsi.2025.v1.i4.004 (дата обращения: 19.05.2026).

4. Шерали, Олег, Александр. Анализ зарубежного опыта применения ТИМ-технологий при эксплуатации мостовых сооружений / Шерали, Олег, Александр. // Doi: сайт. Обновляется ежедневно. URL: https://doi.org/10.26297/2312-9409.2025.4.4 (дата обращения: 19.05.2026).

5. Leontieva MM., Sanina AG.. От информирования к взаимодействию? Особенности развития цифровых каналов коммуникации граждан и власти в регионах России / Leontieva MM., Sanina AG.. // Doi: сайт. Обновляется ежедневно. URL: https://doi.org/10.17323/1811-038x-2025-34-2-49-74 (дата обращения: 19.05.2026).

6. КОВАЛЕВСКАЯ. СЕМЬЯ И БРАК В РЕГИОНАХ РОССИИ / КОВАЛЕВСКАЯ. // Doi: сайт. Обновляется ежедневно. URL: https://doi.org/10.26726/rppe2024v12sibvr (дата обращения: 19.05.2026).

7. Огурцов, Ермошин. Метод прогнозирования усилий в железобетонных пролетных строениях мостовых сооружений при их проектировании и эксплуатации / Огурцов, Ермошин. // Doi: сайт. Обновляется ежедневно. URL: https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/169-182 (дата обращения: 19.05.2026).

8. Аузин, Каратаев. Георадиолокационное обследование мостовых сооружений: вопросы методики проведения полевых исследований, обработки и интерпретации материалов. Часть 2 – свайные фундаменты мостовых опор / Аузин, Каратаев. // Doi: сайт. Обновляется ежедневно. URL: https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/1/102-110 (дата обращения: 19.05.2026).

УДК 621.316.57

Шлионская Ю. Д., Емцов И. А.
Алтайский государственный технический университет имени И. И. Ползунова, Барнаул, Россия

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ С САМОНАСТРАИВАЮЩИМСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ РАСЦЕПИТЕЛЕМ

Аннотация: в электрических сетях объектов агропромышленного комплекса (АПК) расчётные токи однофазного короткого замыкания на удалённых участках нередко оказываются вблизи нижней границы зоны срабатывания электромагнитного расцепителя стандартного автоматического выключателя с фиксированной заводской уставкой. Вследствие допускаемого разброса защитных характеристик часть выключателей не обеспечивает мгновенного отключения аварии — защита реализуется тепловым расцепителем с выдержкой времени от нескольких десятков секунд до нескольких минут, что создаёт реальную угрозу пожара. Существующие методы решения проблемы требуют участия квалифицированного специалиста и знания параметров конкретной сети. В настоящей работе проведён теоретический прогностический анализ концепции автоматического выключателя с самонастраивающимся электромагнитным расцепителем (СНЭР) — гипотетического устройства, уставка которого автоматически адаптируется к фактическому уровню тока короткого замыкания в защищаемой сети без участия персонала. Проведён сравнительный анализ условий срабатывания стандартных выключателей и выключателя с СНЭР. Выявлены прогнозируемые преимущества и ограничения концепции.

Ключевые слова: автоматический выключатель; электромагнитный расцепитель; самонастройка уставки; ток короткого замыкания; защита электрических сетей АПК; время-токовая характеристика; коэффициент чувствительности.

Цель работы - провести теоретический прогностический анализ эффективности гипотетического автоматического выключателя с самонастраивающимся электромагнитным расцепителем применительно к условиям внутренних электрических сетей объектов АПК и оценить потенциальные преимущества и ограничения данной концепции по сравнению с существующими решениями.

Агропромышленные объекты электроснабжаются, как правило, от трансформаторных подстанций через воздушные линии значительной протяжённости. Внутренняя проводка объектов выполняется проводами относительно малого сечения и также достигает значительной длины. Совокупность этих факторов обусловливает повышенное сопротивление

петли «фаза-ноль» и низкий уровень расчётных токов однофазного короткого замыкания (КЗ) на удалённых участках сети [1, 2].

Автоматические выключатели серий ВА и АЕ, массово применяемые во внутренних сетях АПК, оснащены электромагнитными расцепителями (ЭМР) с фиксированными заводскими уставками. Диапазон разброса фактических токов срабатывания ЭМР составляет ±20…40 % от среднего значения [1]. Пороговые значения токов срабатывания ЭМР для основных типов выключателей, применяемых в АПК, приведены в таблице 1 (по данным [1, табл. 3]).

Таблица 1 – Пороговые значения токов срабатывания ЭМР автоматических выключателей [1, табл. 3]

Тип выключателя	**Значение**	**16 А**	**25 А**	**32 А**	**40 А**	**50 А**	**63 А**
АЕ	макс.	268	420	537	672	840	1058
	ср.	192	300	384	480	600	756
ВА(С)	макс.	160	250	320	400	500	630
	ср.	120	188	240	300	375	473
ВА(В)	макс.	80	125	160	200	250	315
	ср.	64	100	128	160	200	252

Из таблицы 1 видно, что при низких расчётных токах КЗ, характерных для сетей АПК, значения $I_{кз}$ могут оказаться ниже максимального тока срабатывания ЭМР для ряда типов выключателей. В таком случае условие гарантированного срабатывания ЭМР не выполняется, и защита осуществляется только тепловым расцепителем с недопустимо большой выдержкой времени. По данным работы [3], длительное протекание аварийного тока через изоляцию проводки является одной из основных причин пожаров на объектах АПК. Условие гарантированного срабатывания ЭМР при КЗ на конце защищаемого участка формулируется через коэффициент чувствительности:

$$К_ч = \frac{I_{КЗ.min}}{I_{эмр}} \geq 1.1 \quad (1)$$

Где, $I_{КЗ.min}$ - минимальный расчётный ток однофазного КЗ на конце линии, А; $I_{эмр}$ - ток срабатывания ЭМР, А; 1,1 - нормативный минимум коэффициента чувствительности согласно ПУЭ-7 [4].

Ток срабатывания ЭМР стандартного выключателя задаётся кратным номинальному току теплового расцепителя:

$$I_{эмр} = К \times I_{Н} \text{ (2)}$$

Где, К - коэффициент кратности, принимаемый по типу характеристики: для B - K = 3…5, для C - K = 5…10, для D - K = 10…20; $I_{Н}$ - номинальный ток теплового расцепителя, А [4, 5].

Расчётный ток однофазного КЗ на конце внутренней линии определяется по формуле:

$$I_{КЗ} = \frac{U_{Ф}}{(Z_T + Z_{пет})} \text{ (3)}$$

Где, $U_{Ф}$ - фазное напряжение, В; Z_T - полное сопротивление трансформатора, приведённое к стороне 0,38 кВ, Ом; $Z_{пет}$ - сопротивление петли «фаза-ноль» от шин НН подстанции до точки КЗ, Ом.

Сопротивление петли складывается из сопротивлений внешней воздушной линии и внутренней проводки:

$$Z_{пет} = Z_{вл} + Z_{вн} \text{ (4)}$$

где $Z_{вл}$ — сопротивление петли внешней ВЛ, Ом; $Z_{вн}$ - сопротивление петли внутренней проводки, Ом. Каждая составляющая определяется как:

$$Z = 2 \times L \times \sqrt{(r_0^2 + x_0^2)} \text{ (5)}$$

где L - длина участка, км; r_0 - удельное активное сопротивление провода, Ом/км; x_0 - удельное индуктивное сопротивление провода, Ом/км. Значения r_0 и x_0 принимаются по справочным таблицам в зависимости от материала и сечения провода [5].

Для оценки эффективности срабатывания ЭМР по данным работы [1] разработаны номограммы, позволяющие без проведения расчётов сопоставить расчётный ток КЗ со средними и максимальными значениями токов срабатывания ЭМР различных типов выключателей. Настоящая работа использует тот же расчётный аппарат и те же исходные данные применительно к анализу концепции СНЭР.

Анализ существующих подходов показывает, что оба известных метода повышения эффективности защиты - номограммный подбор выключателя [1, 2] и применение аппаратов с электронным расцепителем [6] - требуют участия квалифицированного специалиста, знающего параметры конкретной сети. На большинстве малых объектов АПК такой специалист отсутствует.

В качестве перспективного решения рассматривается концепция автоматического выключателя с самонастраивающимся электромагнитным расцепителем (СНЭР). Данное устройство рассматривается как «чёрный ящик»: его внутреннее устройство и схемотехническая реализация в рамках настоящей работы не рассматриваются. С точки зрения внешнего поведения устройство характеризуется следующим: при включении в сеть оно автоматически определяет расчётный ток КЗ в защищаемой цепи и на основании полученного значения самостоятельно устанавливает уставку ЭМР по соотношению:

$$I_{\text{уст}} = a \times I_{\text{кз.расч.}} \quad (6)$$

Где, $I_{\text{кз.расч.}}$ - расчётный ток КЗ, определённый устройством для защищаемой цепи, А; α - коэффициент надёжности срабатывания, $0 < \alpha < 1$. Значение α принимается таким образом, чтобы обеспечить выполнение условия (1) с учётом возможного снижения фактического тока КЗ относительно расчётного.

Уставка ограничивается снизу условием нечувствительности к пусковым токам нагрузки и сверху - допустимым значением для данного номинала выключателя:

$$I_{\text{пуск}.max} \leq I_{\text{уст}} \leq I_{\text{уст}.max} \quad (7)$$

Где, $I_{\text{пуск}.max}$ - максимальный пусковой ток нагрузки в защищаемой цепи, А; $I_{\text{уст}.max}$ - максимально допустимая уставка ЭМР для данного типа выключателя, А.

Принципиальное отличие СНЭР от выключателя с электронным расцепителем [6] состоит в том, что оптимальная уставка определяется и устанавливается автоматически, без расчётов и ручного вмешательства персонала.

В таблице 2 приведено сравнение условий срабатывания стандартных выключателей и выключателя с СНЭР при одинаковых условиях сети. Значения токов срабатывания ЭМР стандартных выключателей приняты по таблице 1 [1]. Для выключателя с СНЭР уставка формируется автоматически по формуле (6), что обеспечивает выполнение условия (1) при любых параметрах сети, удовлетворяющих ограничению (7).

Таблица 2 – Сравнительный анализ условий срабатывания стандартных выключателей и выключателя с СНЭР

Показатель	**BA(C), AE**	**BA(B)**	**СНЭР**
Уставка ЭМР	Фиксированная, задана на заводе	Фиксированная, задана на заводе	Адаптивная, определяется автоматически
Выполнение Кч ≥ 1,1 при низком $I_{кз}$	Не гарантировано (зависит от экземпляра)	Как правило, да (низкая уставка)	Гарантировано при выполнении условия (7)
Риск ложного срабатывания при пуске двигателя	Низкий (высокая уставка)	Повышенный (низкая уставка)	Исключён условием (7)
Требует участия специалиста	При подборе типа и номинала	При подборе типа и номинала	Нет
Адаптация при изменении	Нет	Нет	Да,

Показатель	**ВА(С), АЕ**	**ВА(В)**	**СНЭР**
параметров сети			автоматически
Применимость на линиях с двигательной нагрузкой	Да	Ограничена	Зависит от выполнения условия (7)

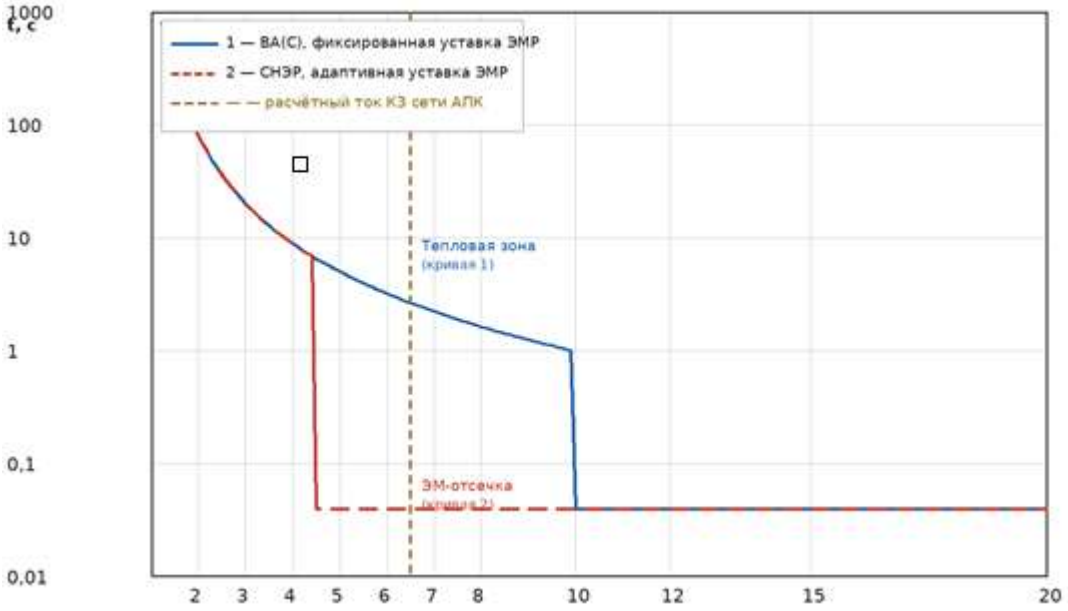


Рисунок 1 - Сравнительные время-токовые характеристики: кривая 1 - стандартный выключатель серии ВА(С) (зона ЭМ-отсечки начинается при токе, превышающем максимальное значение Iэмп из таблицы 1); кривая 2 - выключатель с СНЭР (зона отсечки начинается при токе Iуст = α · Iкз.расч). Вертикальная пунктирная линия - расчётный ток КЗ для рассматриваемой сети. При низком Iкз кривая 1 остаётся в зоне теплового расцепления, тогда как кривая 2 - в зоне мгновенного срабатывания.

Научная новизна настоящей работы состоит в следующем: Сформулирована концепция автоматического выключателя с самонастраивающимся электромагнитным расцепителем применительно к условиям электрических сетей АПК. В отличие от выключателей с электронным расцепителем [6], где уставка выставляется специалистом вручную, концепция СНЭР предполагает полностью автономное определение уставки без участия персонала.

Проведён теоретический прогностический анализ эффективности данной концепции с использованием расчётного аппарата и пороговых значений токов срабатывания ЭМР, установленных в работе [1]. Показано, что применение СНЭР позволяет обеспечить выполнение условия $K_ч \geq 1{,}1$ (требование ПУЭ-7 [4]) там, где стандартные выключатели серий ВА(С) и АЕ данное условие не выполняют.

Выявлены условия применимости концепции СНЭР: устройство эффективно на линиях с низким расчётным током КЗ и умеренной нагрузкой, при которой выполняется ограничение (7). На линиях с крупной двигательной нагрузкой применение СНЭР требует дополнительного анализа.

В работе поставлена проблема недостаточной эффективности защиты внутренних электрических сетей объектов АПК стандартными автоматическими выключателями с фиксированной уставкой ЭМР при низких расчётных токах КЗ. Показано, что вследствие допускаемого разброса защитных характеристик (±20…40 % [1]) часть выключателей серий ВА(С) и АЕ не обеспечивает выполнения условия $K_ч \geq 1{,}1$, в результате чего защита реализуется тепловым расцепителем с недопустимо большим временем отключения.

Предложена концепция выключателя с СНЭР, рассматриваемого как «чёрный ящик»: устройство автоматически определяет расчётный ток КЗ в защищаемой цепи и формирует уставку ЭМР по формуле (6) без участия персонала. Теоретический анализ показал, что при выполнении ограничения (7) применение данной концепции обеспечивает гарантированное выполнение условия $K_ч \geq 1{,}1$ в тех случаях, где стандартный выключатель этого не обеспечивает.

Основные ограничения концепции - несовместимость с линиями, имеющими значительную двигательную нагрузку при малом расчётном токе КЗ, а также неопределённость, связанная с отсутствием разработанного прототипа. Результаты работы могут служить теоретическим обоснованием для постановки задачи схемотехнической разработки и экспериментальной апробации устройства с СНЭР.

Список литературы:

1. Сошников А.А., Титов Е.В. Экспресс-диагностика функциональной эффективности автоматических выключателей во внутренних сетях объектов АПК // Сборник научных трудов. — Барнаул, 2023. — С. 109–114. (Таблица 3: пороговые значения токов срабатывания ЭМР.)

2. Сошников А.А., Титов Е.В. Выбор результативных решений при защите объектов АПК автоматическими выключателями // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2023. — № 1 (357). — С. 4–9. DOI: 10.33979/2073-7408-2023-357-1-4-9.

3. Сошников А.А., Титов Е.В. Влияние структурно-параметрических характеристик защиты электрических сетей АПК на пожарную опасность коротких замыканий // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2022. — № 4 (210). — С. 119–124.

4. Правила устройства электроустановок. Издание 7 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.elec.ru/library/direction/pue.html (дата обращения: 10.04.2025).

5. Куликова Л.В., Никольский О.К., Сошников А.А. Основы электромагнитной совместимости: учебник для вузов. — 4-е изд. — М.: Директ-Медиа, 2020. — 404 с.

6. Конев Е.М. Экономическая эффективность применения автоматических выключателей с электронным расцепителем // Сборник материалов конференции. — Барнаул, 2024. — С. 302–304.

7. Попов М.Г., Лапидус А.А., Соловьева С.Н. Особенности выбора расчётного вида короткого замыкания при определении чувствительности защитных аппаратов в сетях 0,4 кВ // Релейная защита и автоматизация. — 2022. — № 2 (47). — С. 11–15.

УДК 69.059.7:004.94

Гаранькин А. А.
Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, Рязань, Россия

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Аннотация. В настоящей статье рассматриваются теоретические и практические аспекты внедрения технологий информационного моделирования при проведении работ по реконструкции объектов капитального строительства. Отмечается принципиальное различие между проектированием «с нуля» и работой с существующим объектом, обладающим накопленными деформациями, скрытыми дефектами и измененной геометрией. Автором проанализированы основные этапы формирования информационной модели на основе данных лазерного сканирования, приведены примеры коллизий, возникающих при интеграции новой инженерной инфраструктуры в исторические конструкции. Особое внимание уделено вопросам нормативного регулирования и экономической эффективности применения BIM-технологий на этапе эксплуатации обновленного здания.

Ключевые слова: информационное моделирование зданий, реконструкция, лазерное сканирование, облако точек, обратное проектирование, управление жизненным циклом, коллизии, ортогональные чертежи.

Реконструкция зданий и сооружений представляет собой один из наиболее сложных видов строительной деятельности, что обусловлено высокой степенью неопределенности исходных данных. В отличие от нового строительства, где проектировщик оперирует идеализированной геометрией и прогнозируемыми свойствами материалов, при реконструкции специалист сталкивается с объектом, имеющим фактический износ, отклонения от проектной документации прошлых лет, а также недокументированные изменения, внесенные в процессе предыдущих ремонтов. Традиционные методы обследования, основанные на ручных замерах и составлении двухмерных чертежей, зачастую демонстрируют недостаточную точность и информативность, что приводит к возникновению непредвиденных работ и росту сметной стоимости. Внедрение технологий информационного моделирования предлагает принципиально иной подход, основанный на создании единого достоверного цифрового двойника объекта, однако практика применения BIM при реконструкции сопряжена с рядом методологических и технологических ограничений, требующих отдельного анализа.

Ключевое отличие реконструктивного BIM-моделирования заключается в источнике исходных данных. Если для нового строительства модель

строится «от идеи», то есть параметрически, с заложенными зависимостями между элементами, то для реконструкции основой служат результаты натурных обмеров. Наиболее высокую точность на сегодняшний день обеспечивает технология наземного лазерного сканирования, позволяющая получать облако точек, которое с плотностью до нескольких миллиметров фиксирует реальную геометрию стен, перекрытий, узлов сопряжений и инженерных коммуникаций. Однако прямое преобразование облака точек в твердотельную или поверхностную модель сталкивается с проблемой «цифрового шума» — избыточного массива данных, включающего отражения от случайных объектов, пыли или временных креплений. На этапе постобработки требуется выполнить процедуру фильтрации и сегментации, классифицируя точки по принадлежности к конструктивным элементам [1].

Далее следует процесс обратного проектирования, при котором на основе очищенного облака точек создаются параметрические объекты информационной модели. Именно здесь возникает главное противоречие: реальное здание никогда не является идеально вертикальным или прямоугольным. Отклонения кладки от вертикали, просадки фундаментов, непрямолинейность ригелей — эти факторы делают невозможным использование стандартных библиотек элементов без их глубокой адаптации. В практике реконструкции исторических зданий, например, при приспособлении бывших промышленных цехов под общественные пространства, инженеры вынуждены создавать нестандартные семейства, где геометрия элемента жестко привязана к фактическому положению несущих конструкций, полученному при сканировании. Такой подход, хотя и повышает трудоемкость начального этапа, снижает количество разночтений на строительной площадке.

Наиболее значимый экономический эффект от применения BIM при реконструкции достигается на этапе координации разделов проекта. Вмешательство в существующий каркас здания предполагает прокладку новых инженерных систем — вентиляции, кондиционирования, водоснабжения и электроснабжения — в условиях жестких ограничений по высоте помещений и несущей способности перекрытий. Информационная модель позволяет в автоматическом режиме провести обнаружение коллизий между вновь проектируемыми воздуховодами и существующими железобетонными балками или историческими сводами. Показательным примером служит реконструкция зданий под атриумные пространства, где новые металлические лестницы и лифтовые шахты необходимо вписать в сложившийся шаг колонн. Традиционный метод двухмерного совмещения слоев часто пропускает пространственные конфликты, например, пересечение трубы пожаротушения с диагональной связью узла усиления, тогда как в информационной среде такие конфликты визуализируются немедленно [2].

Однако следует отметить, что настройка правил обнаружения коллизий для реконструкции требует особой методологии. Большинство программных комплексов заложены на поиск пересечений твердых тел, тогда как при реконструкции критически важными являются не только жесткие пересечения, но и нарушения нормативных зазоров. Например, тепловая изоляция нового стояка отопления не должна касаться старой деревянной балки перекрытия из соображений пожарной безопасности. В информационной модели необходимо задать не только габариты оборудования, но и защитные зоны, что увеличивает вычислительную нагрузку, но обеспечивает соответствие требованиям сводов правил.

При работе с существующими зданиями информационная модель неизбежно содержит зоны с различной степенью достоверности. Научный интерес представляет классификация уровней развития элемента применительно к реконструкции. Если для нового строительства четко определены уровни развития от концептуальной проработки до исполнительной модели, то для реконструкции предлагается использовать дополнительную систему атрибутов, описывающую способ получения геометрии. Элементы, верифицированные лазерным сканированием, получают высший уровень надежности. Элементы, восстановленные по архивным чертежам, но не подтвержденные инструментально, маркируются как предположительные. Элементы, скрытые за отделкой или недоступные для обмера, требуют назначения вероятностных характеристик, например, диапазона возможных значений прочности бетона. Такой подход позволяет лицу, принимающему решение, видеть не только идеализированную картинку будущего здания, но и карту рисков [3].

В практике реконструкции объектов транспортной инфраструктуры, например, при надстройке дополнительных этажей над действующими железнодорожными вокзалами, выявление скрытых полостей в старом фундаменте на этапе моделирования дает возможность заранее спроектировать мероприятия по усилению основания без остановки движения поездов. Информационная модель в данном случае выступает не просто как геометрическая база, но как система поддержки принятия решений, интегрирующая данные о материалах, датах предыдущих обследований и предполагаемых остаточных ресурсах.

Внедрение BIM-технологий при реконструкции сдерживается несовершенством нормативной документации. Существующие стандарты на информационное моделирование, как правило, ориентированы на новые объекты и не описывают процедуру приемки модели, созданной по результатам сканирования. Остается открытым вопрос о юридической силе координационной модели, содержащей отклонения от проектных осей. Если в новом строительстве допуск на отклонение стен от вертикали задается

проектом, то при реконструкции проектировщик вынужден принимать существующие отклонения как данность и адаптировать новые конструкции под них. Требуется разработка отдельной нормативной методики, регламентирующей, какие отклонения могут быть оставлены без исправления при условии подтверждения модели расчетом, а какие требуют разборки и перекладки. Кроме того, значительной проблемой остается совместимость форматов данных при передаче модели от подрядчика, выполнившего сканирование, к проектной организации и далее к генподрядчику. Практика показывает, что при конвертации облака точек в формат твердотельной модели теряется часть атрибутивной информации, в частности, данные об отражательной способности поверхности, которая может косвенно указывать на влажность материала или наличие биопоражений. Для научно обоснованной реконструкции было бы целесообразно сохранять первичные данные лазерного сканирования в неизменном виде на протяжении всего проекта, используя их как эталонную базу для выборочного контроля [4].

Анализ практических примеров реконструкции крупных общественных зданий, проведенный на основе данных за последние пять лет, позволяет утверждать, что применение BIM-технологий становится экономически оправданным при сложности объекта выше определенного порога. Для небольших зданий с регулярной планировкой затраты на высокоточное сканирование и создание детализированной информационной модели могут превышать стоимость проектных работ традиционным методом. Однако для объектов площадью более пяти тысяч квадратных метров, имеющих развитые инженерные системы и историческую ценность, сокращение количества пересечений на строительной площадке снижает объем дополнительных работ на величину от десяти до пятнадцати процентов от сметной стоимости, что полностью компенсирует затраты на цифровизацию.

В перспективе дальнейшее развитие технологий будет связано с автоматизацией процесса распознавания элементов здания непосредственно в облаке точек с применением методов машинного обучения. В настоящее время перенос геометрии с облака точек в параметрическую модель в значительной степени выполняется вручную, что занимает до семидесяти процентов времени работы инженера-модельера. Создание алгоритмов, способных автоматически выделять колонны, балки, оконные проемы и инженерные коммуникации по характерным геометрическим признакам и отражательной способности, позволит снизить порог входа BIM-технологий в сектор реконструкции массовой застройки, включая жилые дома первых массовых серий [5].

Таким образом, применение BIM-технологий при реконструкции зданий и сооружений представляет собой не механический перенос методов нового строительства, а самостоятельную дисциплину со своей методологией,

инструментарием и ограничениями. Основой для информационной модели здесь служат данные лазерного сканирования, прошедшие этапы фильтрации и обратного проектирования, причем геометрия каждого элемента должна быть привязана к фактическим обмерам, а не к идеализированному чертежу. Ключевым преимуществом является возможность достоверного обнаружения коллизий между новыми инженерными системами и существующими конструкциями, а также классификация зон модели по степени достоверности, что превращает ее в инструмент управления рисками.

Список литературы:

1. Король Е.А., Дрепалов И.Ф. РЕКОНСТРУКЦИЯ ЗДАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ // Системные технологии. 2021. №4 (41). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rekonstruktsiya-zdaniy-s-ispolzovaniem-bim-tehnologiy (дата обращения: 17.05.2026).
2. Муртазин Д.Т. Преимущества и перспективы использования BIM-модели в реконструкции гражданских и промышленных объектов / Д.Т. Муртазин // Вектор научной мысли. – 2023. – № 5 (5). – С. 233-235.
3. Дронов Д.С., Киметова Н.Р., Ткаченкова В.П. Проблемы внедрения BIM - технологий в России // Синергия наук. 2017. № 10. - С. 529-549 –
4. Медведь, Д.Д. Применение BIM-технологий при реконструкции зданий / Д. Д. Медведь. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2026. — № 15 (618). — С. 40-45.
5. Высоцкая, Д. В. Преимущества применения BIM-технологий в процессе реконструкции зданий и сооружений / Д. В. Высоцкая; науч. рук. Н. В. Носко // Экономика и управление: социальный, экономический и инженерный аспекты: сборник научных статей VI Международной научно-практической конференции, Брест, 23–24 ноября 2023 г.: в 2 частях / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет, Кафедра менеджмента; редкол.: И. М. Гарчук [и др.]. – Брест: БрГТУ, 2023. – Часть 2. – С. 71–75.

УДК 69.059.25

Гаранькин А. А.
Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, Рязань, Россия

ОРГАНИЗАЦИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ КАМЕННЫХ ЗДАНИЙ В УСЛОВИЯХ СТЕСНЕННОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Аннотация. В настоящей работе рассматриваются организационно-технологические особенности проведения реконструкции каменных зданий, расположенных в зоне сложившейся городской застройки. Анализируются факторы стесненности, влияющие на выбор методов усиления конструкций, логистику материалов и безопасность смежных объектов. Приводятся примеры технических решений, направленных на минимизацию деформаций грунтов основания и сохранение исторического облика зданий. Отдельное внимание уделяется вопросам мониторинга технического состояния окружающей застройки в процессе производства работ.

Ключевые слова: реконструкция, каменные здания, стесненная городская застройка, усиление конструкций, мониторинг деформаций, технологическая карта, нулевой цикл.

Реконструкция каменных зданий в исторических районах крупных городов сопряжена с комплексом ограничений, объединяемых понятием «стесненные условия». К таким условиям относятся: отсутствие свободных территорий для складирования материалов, ограниченный доступ строительной техники, близость функционирующих объектов культурного наследия, а также необходимость сохранения существующих подземных инженерных сетей. По данным натурных обследований, более семидесяти процентов каменных зданий, возведенных до середины двадцатого века, эксплуатируются с превышением проектных нагрузок или имеют физический износ несущих стен, достигающий сорока процентов. В связи с этим разработка эффективных организационных схем реконструкции в условиях стесненности приобретает ключевое значение для обеспечения безопасности городской среды.

Стесненность городской застройки рассматривается как совокупность пространственных, технологических и эксплуатационных ограничений. Пространственные ограничения выражаются в малых расстояниях между реконструируемым зданием и соседними строениями, которые часто не превышают трех-пяти метров. Технологические ограничения связаны с невозможностью использования башенных кранов большой грузоподъемности или тяжелых вибропогружателей для забивки свай из-за риска повреждения фундаментов соседних зданий. Эксплуатационные ограничения определяются необходимостью бесперебойной работы

городской инфраструктуры: проезд транспорта, доступ пешеходов, работа подземных коммуникаций. Для каменных зданий, которые характеризуются низкой сопротивляемостью неравномерным осадкам, стесненные условия создают дополнительную опасность. Например, при выполнении земляных работ в непосредственной близости от ленточного фундамента соседнего здания (на расстоянии менее двух метров) возникают горизонтальные деформации грунта, приводящие к раскрытию трещин в кирпичной кладке. Анализ аварийных ситуаций за последние десять лет показывает, что более тридцати процентов деформаций исторической застройки происходит именно по причине неучтенных технологических воздействий при реконструкции смежных объектов [1].

Наиболее ответственным этапом реконструкции каменных зданий в стесненных условиях является выполнение работ нулевого цикла, включающих усиление оснований, замену фундаментов и прокладку новых коммуникаций. Традиционные методы, такие как устройство буронабивных свай с уширением, требуют размещения бурового оборудования, которое занимает полосу шириной не менее четырех метров. В условиях, когда расстояние до соседнего здания составляет всего два с половиной метра, применяются альтернативные технологии.

Одним из эффективных решений является метод инъекционного упрочнения грунтов с использованием цементных и полиуретановых составов. Данный метод позволяет повысить несущую способность основания без разработки грунта и устройства ограждающих конструкций. При этом необходимо строго контролировать давление инъекции, которое не должно превышать двух атмосфер, чтобы избежать гидроразрыва пласта и выдавливания грунта в сторону соседнего фундамента. Примером успешного применения служит реконструкция трехэтажного каменного здания в центральном районе Санкт-Петербурга, где через инъекционные скважины диаметром сорок миллиметров был подведен твердеющий раствор под подошву существующего фундамента, что позволило увеличить нагрузку на основание на тридцать процентов без остановки эксплуатации соседних строений.

Как верно отмечает Распопова, К. И., для замены изношенных фундаментов каменных зданий в стесненных условиях применяется метод последовательного захватного усиления. Суть метода заключается в том, что фундамент разбивается на малые захватки длиной не более одного метра. На каждой захватке производится локальная разборка кладки, установка домкратной балки и поэтапное подведение железобетонной обоймы. Благодаря малому размеру захватки удается избежать перераспределения усилий в стене, которое могло бы привести к хрупкому разрушению старой каменной кладки[2].

Организация реконструкции каменных зданий в условиях стесненной застройки требует пересмотра классических принципов складирования. Поскольку приобъектные склады часто отсутствуют, применяется система «точной доставки» (без употребления иностранных терминов — «снабжения по мере монтажа»). Материалы и конструкции доставляются на площадку непосредственно в момент их установки. Например, металлические балки для устройства перекрытий поступают в контейнерах с жестким временным графиком: разгрузка производится в оконный проем или через специально устроенный временный проем в стене. Для этого на этапе подготовки здания формируется технологическая схема материальных потоков, исключающая накопление запасов на территории.

Ограждение строительной площадки в стесненных условиях должно выполнять не только функцию безопасности, но и функцию защиты соседних зданий от вибрации и осадки. В этой связи вместо легких сетчатых ограждений применяются шпунтовые ограждения из стального двутавра или композитных материалов, которые забиваются без вибрации — методом вдавливания. Такое ограждение образует жесткую диафрагму, препятствующую горизонтальному смещению грунта. Известен случай реконструкции пятиэтажного каменного дома в Москве, где использование вдавливаемого шпунта позволило вести разработку котлована на глубину четыре метра на расстоянии полутора метров от соседнего здания, построенного в конце девятнадцатого века на песчаном основании. Максимальная зафиксированная осадка соседнего здания не превысила пяти миллиметров, что находится в пределах допустимых значений [3].

В условиях стесненной застройки обязательным требованием является организация непрерывного мониторинга деформаций как реконструируемого здания, так и всех соседних строений, попадающих в зону влияния работ. Для каменных зданий, чья кладка обладает низкой пластичностью, критически важно фиксировать раскрытие трещин с точностью до 0,1 миллиметра. С этой целью используются маяки следующих типов: гипсовые (для визуального контроля) и тензометрические (для количественной оценки). Установка маяков производится на каждом этаже, а также в местах сопряжения продольных и поперечных стен. Особый случай представляет реконструкция каменных зданий, имеющих статус объекта культурного наследия. Здесь помимо геодезического мониторинга осадок требуется контроль вибрационных воздействий. Допустимые уровни виброскорости для исторической каменной кладки с известковым раствором не превышают 2 миллиметров в секунду. Превышение этого порога может вызвать необратимое разрушение межкаменных связей. Поэтому все процессы, связанные с механизированным бурением, демонтажными работами и уплотнением грунта, должны выполняться с применением

вибродемпфирующих прокладок и с использованием оборудования на резиновых гусеницах, снижающих динамические нагрузки.

Рассмотрим в качестве примера реконструкцию четырехэтажного каменного здания, встроенного в квартал жилой застройки середины двадцатого века. Ширина проезда между фасадом реконструируемого здания и противоположным строением составляла шесть метров, из которых две полосы (шириной по три метра) требовалось сохранить для проезда спецтехники и пожарных машин. В этих условиях были приняты следующие организационные решения. Усиление наружных каменных стен выполнялось методом двустороннего наращивания железобетонных обойм толщиной по шесть сантиметров. Армирование осуществлялось сетками из стали периодического профиля диаметром восемь миллиметров, которые крепились к существующей кладке через шпильки, заанкерованные на глубину пятнадцати сантиметров. Бетонирование производилось послойно с использованием мелкозернистой смеси с осадкой конуса четыре-шесть сантиметров, что обеспечивало плотное заполнение зазора между кладкой и опалубкой [4].

Для подачи бетонной смеси использовался бетононасос с распределительной стрелой, установленный на расстоянии десяти метров от здания за пределами зоны стесненности. Опалубочные щиты монтировались рабочими с подмостей, которые крепились непосредственно к стене через инвентарные анкеры, без установки стоек на тротуарную плиту, так как тротуар оставался открытым для пешеходов. Такой подход позволил выполнить усиление стен в полном объеме за двадцать рабочих дней без закрытия проездов и без нарушения пешеходного движения.

К дополнительным требованиям реконструкции каменных зданий в стесненной застройке относятся ограничения по времени, учет городской среды и специальные градостроительные нормы. Выполнение ночных работ запрещено без разрешения органов исполнительной власти из-за шумового воздействия на жилые кварталы. Конфигурация участка и рельеф диктуют выбор конструктивных решений, так как ошибка в фундаменте или водоотводе может нарушить устойчивость соседних строений. Федеральные органы власти вправе устанавливать особые требования к нормативам с учетом специфики исторических районов, включая жесткие пределы деформаций и ограничения по высоте техники. Игнорирование этих требований способно вызвать аварийные ситуации на смежных объектах [5].

Таким образом, организация реконструкции каменных зданий в условиях стесненной городской застройки требует применения специализированных технологических схем, отличных от тех, что используются при новом строительстве или реконструкции на свободных площадках. Ключевыми элементами этих схем являются: отказ от

крупногабаритной техники в пользу малогабаритных установок с регулируемыми параметрами воздействия; использование методов инъекционного и захватного усиления фундаментов; внедрение системы логистики, исключающей промежуточное складирование; а также организация высокоточного мониторинга деформаций как реконструируемого объекта, так и окружающей застройки. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на разработку численных моделей взаимодействия грунтового основания и каменной кладки в условиях последовательного изменения жесткости здания в процессе реконструкции.

Список литературы:

1. Кульчицкий Д. А. ОРГАНИЗАЦИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ В УСЛОВИЯХ СТЕСНЕННОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ // Вестник науки. 2024. №1 (70). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-rekonstruktsii-zhilyh-zdaniy-v-usloviyah-stesnennoy-gorodskoy-zastroyki (дата обращения: 17.05.2026).
2. Распопова, К.И. Современные методы реконструкции жилого фонда и ее эффективность на базе внедрения инновационных технологий / К.И. Распопова. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2021. — № 34 (376). — С. 24-26.
3. Андрюшенков А.Ф., Воловник Н.С., Андрюшенков А.А. ТЕХНОЛОГИЯ ВОЗВЕДЕНИЯ УНИКАЛЬНОГО СООРУЖЕНИЯ В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ. Научный рецензируемый журнал "Вестник СибАДИ". 2018;15(5):726-741.
4. Зайнашева Ю.В., Блиева И.А., Пилюгина М.А., Калашникова Е.А. Проблемы и мониторинг технического состояния эксплуатируемых объектов недвижимости// Аллея науки. 2017 Т. 2 № 11 С. 72-75.
5. Реконструкция территорий: методические указания к курсовому проектированию / Н.В. Димитренко, А.В. Чибирева; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.П. Скачкова. – Пенза: ПГУАС, 2014 – 28 с.

УДК 625.7:628.4

Шестов А. В., Комзалов В. И., Павлова А. С., Мартынов М. В.
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Аннотация: в статье рассмотрены задачи по повышению эффективности использования золошлаковых отходов (ЗШО) при строительстве дорог. Актуальность темы определена наличием значительных накоплений отходов. Цель статьи- показать экономическую эффективность использования ЗШО и снижение экологического ущерба. Использованы методы научного поиска и анализа. По итогу анализа отмечены технологические и экономические барьеры, препятствующие увеличению объемов утилизации. Сделан вывод о необходимости комплексного подхода для расширения использования золошлаковых отходов.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, ЗШО, дорожное строительство, утилизация отходов, экологический ущерб, экономическая эффективность, автомобильные дороги, комплексный подход.

В дорожном строительстве потребляется значительное количество природных ресурсов, которые возможно заменить вторичными, и эта замена является эффективной. Под эффективностью понимается снижение себестоимости капитального строительства, уменьшение накопленных объемов промышленных отходов и максимальное ресурсосбережение. Задача по повышению эффективности утилизации промышленных отходов рассматривалась многими авторами еще с периода плановой экономики. В работах Дворкина Л.И., Баженова Ю.М., Волженского Л.В. рассмотрены направления использования отходов в производстве строительных материалов, приведены основные технологические параметры и технико-экономические показатели применения отходов различных отраслей промышленности. С увеличением объема отходов промышленности, изменением межотраслевого взаимодействия в условиях рыночных отношений, актуальность проблемы возрастает с каждым годом. В исследованиях Лунёва А.А., Русиной В.В., Золотовой И.Ю, Поляковой С.В. подчеркивается необходимость повышения эффективности использования отходов, предлагаются конкретные разработки по применению отходов промышленности в автодорожном строительстве.

Задача по снижению накопления отходов теплоэнергетической промышленности закреплена законодательно в «Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года», утвержденной Правительством РФ в апреле 2025 года [2]. В Стратегии указано, что доля

утилизированных и обезвреженных отходов в общем объеме образованных отходов на 2050 год должна составлять 90%. Для золошлаковых отходов установлен порог в 50%, поскольку накопление этого вида отходов достигает, согласно статистическим данным, 1,7 млрд. тонн, что создает угрозу экологической обстановке в ряде регионов страны. Ранее выработан «Комплексный план по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности», утвержденный Распоряжением Правительства РФ № 1557 от 15.06.2022, реализация которого обеспечивает экологическую безопасность строительных материалов из золы и шлака и создание стимулов для компаний в виде льготного кредитования и налогообложения. В комплексном плане предусмотрено принятие региональных программ по повышению объемов утилизации и развитие наукоемких технологий обработки золошлаковых отходов [1]. На текущий момент 18 субъектов Российской Федерации утвердили региональные программы по увеличению уровня использования продуктов сжигания угля в промышленном обороте. Для автодорожного строительства перечень программных мероприятий, как правило включает в себя использование различного вида грунтов из золошлаковых отходов.

В соответствии с Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 августа 2024 года № 2330-р, в перечень видов работ, выполнение которых осуществляются с обязательным использованием определенной доли вторичного сырья в их составе, внесено дорожное строительство и реконструкция автомобильных дорог [3]. К материалам, в состав которых должны входить шлаковые отходы, отнесены песок, щебень, щебеночно-песчаные смеси и др. Не менее 5% должна составлять доля вторичного сырья. Ограничением может быть только стоимость по сравнению с природными материалами, либо удаленность места источника более чем на 30 километров. Принятие такого документа направлено на стимулирование развития технологий переработки и повторного использования ресурсов, снижение нагрузки на окружающую среду и создание благоприятных условий для устойчивого экономического роста. В декабре 2024 года на совещании в Совете Федерации по вопросам использования золошлаков в хозяйственном обороте, Минпрмторг России поддержал предложение о компенсации транспортных затрат, связанных с перевозкой продуктов, производимых с использованием вторичного сырья. В данном вопросе показателен пример Индии, где стоимость транспортировки золошлаковых отходов в радиусе 100 км полностью покрываются ТЭС, а в радиусе 300 км делится между ТЭС и потребителем.

В Российской Федерации уже реализован ряд проектов с применением золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог. Наиболее значимые по объему: транспортные развязки и надземный путепровод в

районах Московской области. В ходе строительства этих объектов было задействовано 815 тысяч тонн золошлаковых отходов. Проведение капитального ремонта трассы Р-254 «Иртыш» позволило утилизировать 33 тыс. тонн отходов от Барабинской ТЭЦ (г. Куйбышев).

Одним из наиболее перспективных регионов в плане увеличения объемов утилизации золошлаков считается Сибирский федеральный округ, на который приходится порядка 70% от суммарно произвимых отходов в Российской Федерации, а количество накопленных на золоотвалах достигает 420 млн. тонн. В одной только Омской области ежегодно образуется порядка 1,5 млн тонн золошлаков, при этом накопленный объем отходов составляет порядка 80 млн т., которые занимают около 1000 гектар земельных участков для хранения.

Планом реализации Стратегии социально-экономического развития Сибирского федерального округа предусмотрено строительство автомобильной дороги «Северный обход г. Омска» с целью снижения загруженности городских магистралей транзитным транспортом. Спроектировано строительство магистрали протяженностью 61,4 км, а также возведение мостов, путепроводов и транспортных развязок [4]. Размещение городских ТЭЦ в радиусе эффективного транспортного плеча (не более 30 км) позволяет утверждать о наличие экономической эффективности использования золошлаковых отходов при строительстве.

В публикации А.А. Лунева приводится сравнительный расчет применения золошлаковых смесей и традиционных материалов на спроектированном участке Омской обводной дороги с ПК 11+00 по ПК 627+64,19 (Таблица 1) [6, с. 14].

Таблица 1 – Сравнительный расчет

Вид материала	**Требуемый объем, тыс.тонн**	**Общая стоимость, млн.руб**
Грунт (суглинок из карьера)	3 705,75	2 675,15
Золошлаковая смесь (отвалы ТЭЦ-4. ТЭЦ-5)	3 294,17	1 122,55

Согласно расчетам автора экономия денежных средств при выборе золошлаковых материалов достигает 1552,6 млн. рублей.

Помимо снижения стоимости строительства произойдет высвобождение емкостей золоотвалов ТЭЦ на период 2 года, что является еще одним

показателем экономической эффективности в связи с высокой стоимостью строительства новых золоотвалов и реконструкции старых.

По результатам государственной экспертизы проекта Северного обхода г. Омска, были выданы замечания об увеличении доли золошлаковых смесей, используемых в строительстве. Последняя редакция проектной документации предусматривает использование 780 тыс. тонн золошлаковой смеси.

Еще один проект в г. Омск, который реализован в 2025 году – строительство 12 км дороги в особой экономической зоне «Авангард». Проектной документацией предусмотрено применение привозной золошлаковой смеси для отсыпки земляного полотна. Общий объем потребления золошлаковых смесей в этом проекте может достигать 200 тыс. тонн. Анализ практического применения золошлаковых продуктов показывает, что они могут быть широко использованы как грунты и стабилизирующие добавки для дорожных слоев.

При рассмотрении конкретных объектов строительства автомобильных дорог Омской области отмечен явно выраженный экономический эффект при использовании золошлаковых смесей, который определяется не только снижением затрат на приобретение материала, но и сокращением затрат на хранение и утилизацию этих отходов. По сведениям о закупке, опубликованным в Единой информационной системе (ЕИС), стоимость реконструкции золоотвала ТЭЦ-5 составляет 27,7 млн. рублей [7]. Капитальное строительство новой секции обойдется генерирующей компании в 1,09 млрд руб. При увеличении расходов на организацию хранения золошлаковых отходов, потенциальная тарифная нагрузка в части тепловой энергии может достигнуть 5,19%, в части электрической энергии – до 4,28% [5].

Использование отходов промышленности в дорожном строительстве является перспективным направлением, позволяющим сократить расходы на материалы и уменьшить экологическую нагрузку. Успешная реализация региональных программ потребует совместных усилий всех заинтересованных сторон: производителей энергии, дорожно-строительных компаний, научных учреждений и органов власти. Дальнейшее развитие должно включать совершенствование методов переработки отходов и расширение области их применения. Однако этот процесс сталкивается с рядом серьезных технологических барьеров, которые необходимо преодолеть для успешного решения задачи по увеличению объема утилизации золошлаковых отходов. К таким барьерам можно отнести требования к стандартизации и сертификации вторичных ресурсов как строительного материала, высокая стоимость предварительной обработки и зависимость технических характеристик не только от вида сжигаемого топлива, но и от места забора отходов. Необходимо проводить исследовательские испытания

по совместимости вторичных и традиционных материалов, разрабатывать технологии, которые обеспечат долговечность и экологичность конструкций. Отдельно следует отметить проблему согласования проектной документации с действующими нормами и правилами. При внедрении новых методов и материалов нередко возникают разногласия между разработчиками и органами надзора, что приводит к дополнительным временным задержкам и финансовым затратам. Помимо указанных выше, существует ряд экономических препятствий, среди которых можно выделить: неравномерность распределения отходов по регионам строительства, недостаточное информирование участников строительства (начиная с этапа проектирования), нормативно-правовые ограничения и отсутствие инвестиций.

По результатам исследования можно сделать вывод, что для увеличения объемов применения золошлаковых отходов в автодорожном строительстве необходимо использовать не только экономические приемы стимулирования, но и вводить ограничительные меры на добычу природного материала в регионах, имеющих запасы отходов для вторичного использования. Требуется разработка нормативно-правовой и технической документации, которая бы смогла учесть все этапы формирования вторичного сырья из отходов промышленности, чтобы по итогу автодорожное строительство могло получать сертифицированные, безопасные и недорогие материалы. Эти материалы должны снизить объемы потребления природных ресурсов- песка, гравия, грунта и т.п., которые не бесконечны. Применение вторичных ресурсов имеет потенциал не только для повышения экономической эффективности отрасли, но и решения экологических проблем.

Список литературы:

1. Распоряжение Правительства РФ от 15 июня 2022г. № 1557 «Об утверждении комплексного плана по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности»// Система Гарант. URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/404744607/ (дата обращения: 05.12.2025).
2. Распоряжение Правительства РФ от 12 апреля 2025г. № 908-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года»// КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_503079/ (дата обращения: 05.12.2025).
3. Распоряжение Правительства РФ от 28 августа 2024г. № 2330-р «Об утверждении перечня видов продукции (товаров), производство которой осуществляется с обязательным использованием определенной доли вторичного сырья в ее составе и перечня видов работ, услуг, выполнение и оказание которых осуществляются с обязательным использованием определенной доли вторичного сырья в их составе»// Система Гарант. URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/409512671/ (дата обращения: 06.12.2025).
4. Распоряжение Правительства РФ от 16 октября 2023г. № 2846-р «О плане реализации Стратегии социально-экономического развития Сибирского федерального

округа до 2035 года»//Система Гарант. URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407760601/ (дата обращения: 06.12.2025).

5. Золотова И.Ю., Бобылев П.М. ТАРИФНЫЕ И БЮДЖЕТНЫЕ ЭФФЕКТЫ ОТ УВЕЛИЧЕНИЯ ОБЪЕМОВ УТИЛИЗАЦИИ ЗОЛОШЛАКОВ УГОЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В РОССИИ // ЭТАП. 2022. №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tarifnye-i-byudzhetnye-effekty-ot-uvelicheniya-obemov-utilizatsii-zoloshlakov-ugolnyh-elektrostantsiy-v-rossii (дата обращения: 16.12.2025).

6. Лунев А.А. Перспективы использования золошлаковых материалов при строительстве автомобильных дорог в Сибирском федеральном округе// Красноярский экономический форум. URL: https://arvis.online/wp-content/uploads/2023/03/Lunyov_Ekonomika_zamknutogo_czikla_KEF.pdf. (дата обращения: 03.12.2025).

7. Информация о договоре № 5540632320224000154000// Официальный сайт Единой информационной системы в сфере закупок. URL: https://zakupki.gov.ru/epz/contractfz223/card/contract-subject.html?id=19520475 (дата обращения: 11.12.2025).

УДК 004.738.5:681.5

Гайфуллин С. Р., Сандаков В. Д.
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

ОТ ПОЛЕВОЙ ШИНЫ ДО MQTT: ЭВОЛЮЦИЯ ПРОТОКОЛОВ ОБМЕНА ДАННЫМИ В ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

Аннотация. В статье рассматривается эволюция протоколов обмена данными в промышленной автоматизации за последние три десятилетия: от классических полевых шин (Profibus, Modbus RTU, CAN) до современных интернет-ориентированных протоколов (MQTT, OPC UA, AMQP). Авторы анализируют архитектурные различия между протоколами, их преимущества и недостатки в контексте требований к детерминизму, пропускной способности, безопасности и интеграции с корпоративными информационными системами. Особое внимание уделяется переходу от моделей «точка-точка» и «ведущий-ведомый» к публикационно-подписным моделям (publish/subscribe), обеспечивающим масштабируемость и слабую связанность компонентов. Доказано, что сближение IT- и OT-протоколов является объективным трендом цифровой трансформации промышленности, а выбор протокола должен определяться требованиями конкретной задачи: от жесткого реального времени на нижнем уровне до облачной аналитики на верхнем.

Ключевые слова: полевые шины, промышленные протоколы, Profibus, Modbus, CAN, EtherCAT, PROFINET, OPC UA, MQTT, AMQP, промышленный интернет вещей, IIoT, автоматизация технологических процессов, SCADA.

Промышленная автоматизация за последние тридцать лет прошла путь от изолированных контроллеров с жесткой проводкой до распределенных систем, интегрированных с облачными платформами. Ключевым фактором этого прогресса стала эволюция протоколов обмена данными — от простых последовательных шин до легковесных публикационно-подписных протоколов. Понимание этой эволюции необходимо для проектирования современных систем автоматизации, которые должны быть одновременно надежными, безопасными и «облачно-готовыми» [3,5].

Первым этапом стало появление классических полевых шин (fieldbus) в 1980–1990-х годах. До этого каждое устройство подключалось к контроллеру отдельным проводом, что приводило к многожильным кабелям и высокой стоимости монтажа. Полевые шины позволили объединить десятки устройств на одной двухпроводной линии. Modbus RTU (1979, Modicon) стал фактическим стандартом благодаря простоте: архитектура «ведущий-ведомый» (master-slave) поверх RS-485, скорость до 115,2 кбит/с. Недостатки: отсутствие детерминизма, безопасности и проверки целостности данных (только CRC). Profibus (Германия, Siemens) предложил более совершенную архитектуру: Profibus DP обеспечивает скорость до 12 Мбит/с с детерминизмом

за счет передачи маркера (Token Passing), а Profibus PA поддерживает питание по шине для взрывозащищенных датчиков. CAN (Bosch) пришел из автомобильной промышленности, использует арбитраж сообщений на основе приоритетов (CSMA/CA) и передает короткие сообщения (до 8 байт), что идеально для дискретных сигналов [1,9].

Переломным моментом стало появление промышленного Ethernet в начале 2000-х годов. Дешевизна сетевого оборудования и высокая пропускная способность сделали Ethernet привлекательным, но стандартный CSMA/CD не обеспечивал жесткого реального времени. Появились протоколы реального времени, модифицирующие Ethernet: EtherCAT (Beckhoff) пропускает кадр через каждое устройство «на лету», обрабатывая 1000 цифровых сигналов за 30 мкс; PROFINET IRT (Siemens) использует временные слоты; Powerlink (B&R) предлагает свои механизмы. Эти протоколы обеспечивают детерминизм до 1 мс, но требуют специальных чипов [6,8].

Для вертикальной интеграции (SCADA — MES — ERP) был создан OPC UA (Unified Architecture). В отличие от классического OPC Classic (привязан к Windows COM/DCOM), OPC UA является платформенно-независимым, работает поверх TCP, HTTPS и даже может встраиваться в MQTT. Он предлагает объектно-ориентированное адресное пространство (узлы, переменные, методы, события) и встроенную безопасность (аутентификация X.509, шифрование AES). OPC UA стал стандартом де-факто для кросс-вендорного обмена данными, но он достаточно тяжел для микроконтроллеров с ограниченной памятью [2,4].

Для сценариев промышленного интернета вещей (IIoT), где тысячи датчиков передают данные через низкоскоростные или нестабильные каналы, требуются легковесные протоколы. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) был разработан IBM в 1999 году для мониторинга нефтепроводов через спутник. Сегодня это де-факто стандарт IIoT. MQTT работает поверх TCP, имеет заголовок всего 2 байта, поддерживает три уровня QoS (0 — не более одного раза, 1 — хотя бы один раз, 2 — ровно один раз) и механизм последней воли (LWT). Ключевая особенность — топология публикация-подписка (publish/subscribe) с центральным брокером (broker). Клиенты публикуют сообщения на темы, а брокер пересылает их всем подписчикам. Это обеспечивает слабую связанность и масштабируемость. Существуют легковесные реализации MQTT-SN для сетей LoRaWAN, что делает протокол применимым даже на 8-битных микроконтроллерах с 2 КБ RAM [7].

AMQP — более тяжелый протокол, добавляющий очереди, обменники и транзакции (XA), что делает его предпочтительным для интеграции MES и ERP, но редко используется на конечных датчиках. CoAP работает поверх UDP, использует модель запрос-ответ (как HTTP) и подходит для сценариев опроса по требованию, но хуже проходит через корпоративные firewalls.

Важнейший тренд — конвергенция OPC UA и MQTT. Спецификация OPC UA PubSub (2018) определяет передачу сообщений OPC UA через MQTT и UDP. Это позволяет датчикам публиковать компактные сообщения по MQTT, а на стороне сервера они автоматически отображаются в полную OPC UA модель. Проблема нестандартизованности MQTT-данных решается протоколом Sparkplug B (Eclipse Foundation), который определяет форматы сообщений, типы узлов (Device, Node, Metric) и процедуры онлайн/оффлайн.

Эволюцию протоколов можно разделить на четыре этапа. Этап 1 (1980–1995) — последовательные полевые шины (Modbus RTU, Profibus DP, CAN): master-slave, скорости до 12 Мбит/с, отсутствие безопасности. Этап 2 (1995–2005) — промышленный Ethernet (EtherCAT, PROFINET): детерминизм до 1 мс, вендорозависимость. Этап 3 (2005–2015) — OPC UA: платформенная независимость, безопасность, работа поверх TCP. Этап 4 (2015 – н.в.) — легковесные протоколы и конвергенция (MQTT, Sparkplug B, OPC UA PubSub): publish/subscribe, QoS, работа в условиях низкого качества каналов [3,8].

Выбор протокола определяется иерархическим уровнем. На уровне полевых устройств при требовании микросекундной синхронизации (станки с ЧПУ, роботы) — EtherCAT или PROFINET IRT. Для задач мониторинга с периодичностью 100–500 мс — Modbus TCP или PROFINET RT. На уровне управления (SCADA-ПЛК) стандарт — OPC UA. Для передачи данных в облако (Azure, AWS) и сбора телеметрии с удаленных датчиков по LPWAN — MQTT + Sparkplug B.

Безопасность — отдельная проблема. Классические протоколы (Modbus, Profibus, CAN) не имели встроенной защиты, полагаясь на физическую изоляцию сетей. В эпоху IIoT это становится уязвимостью. OPC UA и MQTT (через TLS) обеспечивают современное шифрование и аутентификацию.

При проектировании промышленной системы автоматизации выбор протокола обмена данными не может быть изолированным решением — он предопределяет архитектуру всей системы управления, требования к сетевым компонентам, компетенции персонала и даже стратегию импортозамещения. Для существующих предприятий, эксплуатирующих устаревшие протокольные стеки (например, классические полевые шины Profibus DP или Modbus RTU), критически важным становится вопрос миграции к современным решениям без остановки производства. Существует три стратегии миграции: полная замена контроллеров и периферии («big bang» — практически неприменима для непрерывных производств, таких как нефтепереработка или химия), поэтапная замена с сохранением существующих линий связи (что возможно при переходе с Profibus PA на PROFINET с использованием шлюзов-преобразователей) и гибридная архитектура, при которой устаревший протокол остается на нижнем уровне (датчики-исполнительные механизмы), а на уровне контроллеров и SCADA используется OPC UA через шлюз. Последний подход наиболее

распространен: например, промышленный шлюз Softing FG-200 позволяет преобразовывать трафик Profibus DP в OPC UA с сохранением временных характеристик и поддержкой до 1024 слов входных/выходных данных [5,8].

При выборе между EtherCAT и PROFINET IRT для задач синхронного управления многокоординатными роботами или печатными машинами решающим фактором часто становится экосистема вендора. EtherCAT (Beckhoff, также поддерживается Bosch Rexroth, ABB) обеспечивает более высокую скорость (цикл 250–500 мкс для 50 сервоприводов) и более простую диагностику благодаря прохождению кадра через все устройства, но требует использования специальных чипов (ET1100, ET1200) для каждого ведомого устройства, что увеличивает стоимость распределенной периферии. PROFINET IRT (Siemens, GE, Emerson) работает на стандартном Ethernet-оборудовании с использованием временных слотов и аппаратной поддержки в коммутаторах (PROFINET capable switches), что делает масштабирование сети (до 250 устройств) дешевле, но приводит к более сложной настройке топологии и синхронизации. Практическое правило: для систем с числом ведомых устройств менее 30 и высокими требованиями к стоимости узла — EtherCAT; для крупных распределенных систем (более 100 устройств) с топологией «линия» или «дерево» — PROFINET IRT.

Отдельным вызовом является обеспечение кибербезопасности при использовании MQTT в промышленных средах. Классические брокеры MQTT (Mosquitto, EMQX) поддерживают шифрование TLS, но не предоставляют встроенных механизмов для управления правами доступа на уровне отдельных тем и идентификаторов клиентов в масштабах предприятия (Role-Based Access Control). Расширенные брокеры (HiveMQ, VerneMQ с плагинами) интегрируются с LDAP/Active Directory и позволяют задавать политики вида «устройству с client_id=well_123 разрешено публиковать в тему /oil/well_123/data и подписываться на тему /oil/well_123/command». При этом важно использовать протокол MQTT over TLS с взаимной аутентификацией (mTLS), где и клиент, и сервер проверяют сертификаты друг друга, что предотвращает атаки «человек посередине» и подделку устройств. Для повышения отказоустойчивости брокеры MQTT объединяются в кластер (EMQX поддерживает кластеризацию до 100 узлов с автоматическим перераспределением нагрузки и репликацией сессий), что критично для систем с количеством подключений более 50 000 [7].

Перспективным направлением является использование протокола **Apache Kafka** как шины данных для промышленной аналитики. В отличие от MQTT, Kafka не является протоколом «устройство-брокер» в классическом понимании, а представляет собой распределенный журнал событий (commit log) с хранением сообщений на диске и возможностью их многократного воспроизведения разными потребителями. В промышленных сценариях Kafka применяется на

уровне сбора данных из множества SCADA-систем и ПЛК (через коннекторы Kafka Connect с поддержкой OPC UA, Modbus, MQTT) для последующей загрузки в озера данных (data lakes) и системы машинного обучения. Например, «Газпром нефть» в 2024 году внедрила кластер Kafka для агрегации телеметрии с 12 000 скважин, что позволило снизить нагрузку на центральную SCADA в 8 раз и обеспечить параллельную работу 15 аналитических сервисов (предиктивная диагностика ЭЦН, оптимизация режимов закачки ППД). Kafka, однако, избыточна для прямого подключения датчиков — здесь по-прежнему доминирует MQTT [9].

Наконец, при проектировании гибридных протокольных архитектур необходимо учитывать проблему «двойной задержки» (double latency). Если датчик передает данные по LoRaWAN → шлюз конвертирует в MQTT → брокер MQTT → коннектор к OPC UA → OPC UA сервер → SCADA, то суммарное время доставки может достигать 5–15 секунд, что недопустимо для систем с быстрыми процессами. Решение — размещение OPC UA сервера непосредственно на шлюзе LPWAN (например, на промышленных шлюзах Advantech WISE-710 с поддержкой OPC UA и MQTT) и использование протокола OPC UA PubSub для прямой передачи в SCADA без промежуточного брокера. Такой подход, реализованный на Волховском ГПЗ (2024 г.), позволил сократить задержку с 12 секунд до 2,3 секунды при использовании LoRaWAN с периодичностью опроса датчиков 10 секунд.

Для практической работы с промышленными протоколами необходим набор специализированных инструментов, позволяющих анализировать трафик, эмулировать устройства и диагностировать неисправности. Наиболее распространенными являются промышленные анализаторы протоколов: Wireshark с плагинами для промышленного Ethernet (поддержка PROFINET, EtherCAT, Ethernet/IP), программатор-анализатор CAN (например, PCAN-USB от PEAK-System с программным обеспечением PCAN-View) и промышленные тестеры полевых шин, такие как ProfiTrace для Profibus DP (Procentec) — аппаратно-программный комплекс, позволяющий измерять времена ответа устройств, обнаруживать коллизии на шине и вычислять топологию сети. Для разработки устройств, работающих по протоколам Modbus, OPC UA или MQTT, используются открытые библиотеки и стеки: libmodbus (C/C++), open62541 (реализация OPC UA на C, сертифицирована OPC Foundation), Paho MQTT (C, C++, Python, JavaScript). Важно, что open62541 поддерживает профиль Nano Embedded Device Server, что позволяет запускать OPC UA на микроконтроллерах с 50 КБ RAM и 200 КБ Flash (например, STM32F103). При отладке OPC UA-соединений стандартным инструментом является клиент UaExpert (бесплатный) от Unified Automation, позволяющий просматривать адресное пространство, читать/писать переменные, вызывать методы и подписываться на события [4].

Производительность и задержки в промышленных сетях: как измерять и интерпретировать

Для корректного сравнения протоколов и выбора подхода необходимо понимать метрики производительности промышленных сетей. Ключевая метрика для систем реального времени — детерминизм, то есть способность сети гарантировать максимальное время доставки сообщения (worst-case latency). Для PROFINET IRT с классом синхронизации CC-B максимальная задержка не превышает 1 мс, а для CC-C (изохронный режим) — 250 мкс. EtherCAT гарантирует сквозную задержку для 100 устройств не более 100 мкс. В протоколах, не поддерживающих жесткое реальное время (Modbus TCP, стандартный Ethernet, OPC UA поверх TCP), задержка может варьироваться от 5 мс до 500 мс и более в зависимости от нагрузки на сеть и тайм-аутов. Вторая важная метрика — джиттер (разброс времени доставки). Для управления синхронными электроприводами джиттер должен быть менее 10 мкс (обеспечивают EtherCAT и PROFINET IRT). Для сбора данных с датчиков температуры допустим джиттер до 1 секунды. Третья метрика — пропускная способность (throughput): Modbus RTU на скорости 115,2 кбит/с передает около 400 регистров в секунду (при 16 бит на регистр — 6,4 кбит/с полезных данных из-за служебных байт). PROFINET на 100 Мбит/с обеспечивает до 100 Мбит/с полезной нагрузки, а EtherCAT — до 200 Мбит/с (эффективность >90%). Для интернета вещей важна, напротив, минимальная пропускная способность — MQTT с заголовком 2 байта эффективен для коротких сообщений (до 256 байт), тогда как HTTP с заголовками в сотни байт в 5–10 раз менее эффективен [6,9] .

Практические рекомендации по выбору стека протоколов для типовых промышленных задач

На основе анализа реальных внедрений можно сформулировать следующие практические рекомендации. Для станков с ЧПУ (числовым программным управлением), где требуется синхронизация до 5–10 осей с циклом 500 мкс — выбор однозначно EtherCAT (Beckhoff, Bosch Rexroth) или SERCOS III (Siemens, Indramat), так как они обеспечивают жесткий детерминизм и низкий джиттер. Для роботизированных ячеек (6–12 осей) допускается PROFINET IRT, если используется однородная экосистема Siemens. Для непрерывных технологических процессов (нефтепереработка, химия, металлургия), где время цикла составляет 100–500 мс, а количество сигналов может достигать 10–20 тысяч — стандарт — Modbus TCP (простота, дешевизна) или PROFINET RT. Для вертикальной интеграции между АСУ ТП, MES и ERP — OPC UA (обязательно с использованием двоичного транспорта на порту 4840, так как SOAP/HTTPS в 5–10 раз медленнее). Для сбора телеметрии с удаленных и распределенных объектов (скважины, водозаборы, метеостанции) — MQTT поверх TLS, желательно с использованием Sparkplug B для автоматического обнаружения устройств. Для передачи потоковых данных высокой

интенсивности (видео, вибродиагностика с частотой дискретизации 50 кГц) — Apache Kafka (как шина данных) или стандартный TCP с пользовательским протоколом [4,7] .

Эволюция в сторону унификации: Time-Sensitive Networking (TSN)

Наиболее перспективным направлением развития промышленных протоколов является стандарт TSN (Time-Sensitive Networking) — набор поправок к стандарту IEEE 802.1, который добавляет Ethernet детерминизм без необходимости модификации кадра или использования специальных чипов. TSN вводит концепцию временных слотов (Time-Aware Shaper), приоритизацию трафика (Credit-Based Shaper) и точную синхронизацию времени (IEEE 802.1AS). Благодаря этому через один физический Ethernet-кабель можно передавать одновременно трафик жесткого реального времени (например, управление приводами), трафик soft real-time (SCADA-данные) и обычный IT-трафик (веб-камеры, электронная почта) без взаимного влияния. Ведущие производители (Siemens, B&R, Beckhoff, Rockwell Automation) объявили о поддержке TSN в своих новых контроллерах, а OPC Foundation разрабатывает отображение OPC UA на TSN (OPC UA over TSN), что позволит заменить все существующие промышленные протоколы единым унифицированным стеком. Прогнозируется, что к 2030 году TSN станет стандартом для новых автоматизированных систем, однако на сегодняшний день стоимость оборудования с поддержкой TSN все еще в 2–3 раза выше традиционного промышленного Ethernet, а квалифицированных инженеров по настройке TSN недостаточно.

Безопасность: детальный разбор уязвимостей и методов защиты промышленных протоколов

Промышленные протоколы изначально проектировались для закрытых сетей, и лишь позднее к ним добавлялись средства безопасности. Наиболее частые уязвимости: отсутствие аутентификации (Modbus RTU/TCP — злоумышленник, подключившийся к шине, может отправить любой запрос на запись в любой регистр), отсутствие шифрования (все команды и данные передаются в открытом виде), предсказуемость адресов (сетевые сканеры типа Nmap с промышленными профилями обнаруживают все устройства). Методы защиты: сегментация сети с помощью промышленных firewalls (например, Hirschmann EAGLE, Phoenix Contact mGuard), которые анализируют содержимое пакетов на уровне приложений и пропускают только разрешенные функции (например, разрешить чтение регистров 40001–40010, запретить запись); использование протоколов с безопасностью (Modbus Security (TCP с TLS), PROFINET с интеграцией IEEE 802.1X, OPC UA с шифрованием и подписью, MQTT over TLS); применение глубокого анализа пакетов (DPI, Deep Packet Inspection) на границе OT/IT, выявляющего аномальные последовательности команд (например, запись 32000 в регистр уставки, хотя

допустимый диапазон 0–1000). Важно также регулярно обновлять прошивки устройств, так как многие промышленные контроллеры имеют уязвимости в реализации стека TCP/IP (например, уязвимость Urgent/11, затрагивающая несколько десятков вендоров). Практика показывает, что внедрение политики «наименьших привилегий» и сетевой сегментации снижает риск компрометации промышленной сети на 80% без замены оборудования.

Эволюция от полевых шин к публикационно-подписным протоколам отражает цифровую трансформацию промышленности: от изолированных цехов к управлению на основе данных. Ни один протокол не является универсальным: EtherCAT и PROFINET останутся для синхронного управления, OPC UA — для вертикальной интеграции, MQTT — для облачной телеметрии. Ключевая компетенция современного специалиста — умение проектировать гибридные протокольные архитектуры, выбирая оптимальный инструмент для каждой задачи.

Список литературы:

1. Брег С. Стратегический финансовый директор. / Пер. с англ. — М.: Альпина Паблишер, 2021. — 412 с.
2. Дейвенпорт Т.Х., Ронанки Р. Конкурируя с аналитикой. / Пер. с англ. — М.: Манн, Иванов и Фербер, 2022. — 304 с.
3. Каплан Р.С., Нортон Д.П. Стратегические карты. Трансформация нематериальных активов в материальные результаты. / Пер. с англ. — М.: Олимп-Бизнес, 2020. — 512 с.
4. Кузнецов А.Ю., Михайлова Е.В. Финансовый директор 4.0: новая роль финансового директора в цифровом мире. // Финансовый директор. — 2022. — № 7-8. — С. 24-33.
5. Портер М.Э., Хеппельманн Дж. Как умные, подключенные продукты трансформируют компании. // Harvard Business Review Россия. — 2021. — № 10. — С. 44-57.
6. Проворов А.М. Большие данные в финансах: методы, модели, практика. — М.: Дело, 2023. — 278 с.
7. Смирнова А.В. Цифровая трансформация бизнеса: управление стоимостью в новой реальности. — М.: Инфра-М, 2022. — 189 с.
8. Тельнов Ю.Ф. Архитектура информационных информационных систем в условиях цифровой экономики. — М.: МИСиС, 2021. — 320 с.
9. Шеремет А.Д., Негашев Е.В. Методика финансового анализа деятельности коммерческих организаций. — 3-е изд., перераб. — М.: ИНФРА-М, 2020. — 264 с.

УДК 004.738.5:62-519

Гайфуллин С. Р., Сандаков В. Д.
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ LPWAN-СЕТЕЙ (LORAWAN, NB-IOT) ДЛЯ МОНИТОРИНГА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ, ЖКХ И СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Аннотация. В статье исследуется применение технологий Low Power Wide Area Networks (LPWAN) — LoRaWAN и NB-IoT — для мониторинга распределенных технологических объектов в трех ключевых отраслях: нефтегазодобыче, жилищно-коммунальном хозяйстве и сельском хозяйстве. Авторы анализируют архитектурные различия между LoRaWAN (нелицензируемый спектр, частные сети) и NB-IoT (лицензируемый спектр, операторная инфраструктура), а также критерии выбора технологии в зависимости от удаленности объектов, энергопотребления, требований к проникновению сигнала и стоимости владения. Особое внимание уделяется реальным кейсам внедрения: мониторинг малодебитных нефтяных скважин с использованием частной сети LoRaWAN, контроль водопроводных колодцев и тепловых узлов на базе NB-IoT, а также системы точного орошения в агропромышленном комплексе с применением LoRaWAN и солнечных панелей. Доказано, что LPWAN-технологии позволяют снизить операционные затраты на обслуживание распределенной инфраструктуры в 2–5 раз, обеспечить передачу данных из мест без покрытия сотовой связи и повысить скорость обнаружения аварий с часов до минут.

Ключевые слова: LPWAN, LoRaWAN, NB-IoT, промышленный интернет вещей, мониторинг распределенных объектов, нефтегазовая автоматизация, цифровое ЖКХ, точное земледелие, телемеханика, удаленный сбор данных.

Классические системы автоматизации (АСУ ТП) на базе проводных линий или сотовой связи 2G/3G/4G непригодны для распределенных объектов из-за высокой стоимости прокладки кабеля (1,5–3 млн руб./км), отсутствия энергоснабжения в удаленных точках и дорогой спутниковой связи. LPWAN-сети решают эти проблемы: дальность до 15–50 км, ток потребления десятки мкА в режиме сна, стоимость модуля $5–15.

LoRaWAN работает в нелицензируемом ISM-диапазоне (868 МГц), позволяет развернуть частную сеть без абонентской платы, использует модуляцию CSS с высокой помехоустойчивостью. Ограничение — duty cycle не более 1% (пакет раз в 5–10 минут). NB-IoT — часть стандарта LTE, работает в лицензируемом спектре, обеспечивает скорость до 250 кбит/с, глубокое проникновение сигнала в подвалы и колодцы (повторы NPDSCH до 128 раз), гарантированное QoS. Недостатки — абонентская плата (50–200 руб./мес.) и более высокое энергопотребление [1].

В нефтегазовой отрасли внедрение LPWAN началось с кустов малодебитных скважин. На удалении 3–7 км от ДНС проводная связь нерентабельна. LoRaWAN-решение: беспроводной преобразователь 4–20 мА, литиевая батарея на 5–7 лет, промышленный шлюз на мачте. Проект ПАО «Татнефть» (112 скважин, 2021–2022 гг.) показал снижение операционных затрат на 4 млн руб./год и окупаемость за 11 месяцев. Как отмечается в работе Марисова и др. [3], LoRaWAN демонстрирует высокую эффективность для задач мониторинга нефтепромысловых объектов. Важно: LPWAN допускается только для мониторинга, но не для цепей противоаварийной защиты (ПАЗ) согласно Приказу Ростехнадзора № 116.

В ЖКХ преобладает NB-IoT. Объекты (колодцы, подвалы) находятся в черте города, где есть покрытие операторов, но сигнал должен проходить через железобетон. NB-IoT с повторами «пробивает» до двух перекрытий по 20–30 см. Применение NB-IoT и LoRaWAN для мониторинга систем водоснабжения подробно рассмотрено в работе Капанского [5], где, в частности, анализируется опыт развертывания сетей в городских условиях. Так, проект «Мосводоканала» (2500 колодцев, 2023 г.) с датчиками ТК-Н20 и модулями NB-IoT зафиксировал 47 скрытых утечек за 6 месяцев. Время оповещения сократилось с 6–8 часов до 12–18 минут. Соответствие ГОСТ Р 58072-2018 (вероятность доставки не менее 0,99) и СП 31.13330.2012 (п. 9.15) [2, 4].

В сельском хозяйстве доминирует LoRaWAN из-за отсутствия 4G на 70% пахотных земель РФ. Как отмечают Блохина и Блохин [6], технологии Интернета вещей (IoT) открывают широкие возможности для мониторинга пространственной неоднородности почвенных характеристик в режиме реального времени. Беспроводные сенсорные сети на базе технологий LoRaWAN, ZigBee и других протоколов позволяют размещать автономные датчики под поверхностью земли, обеспечивая передачу данных на интернет-сервер без необходимости частой замены батарей. В российском агропромышленном комплексе аналогичные решения внедряются, например, в агрохолдинге «Эко-культура» (Ставрополье), где развернута сеть из 800 узлов LoRaWAN на площади 2000 га, что позволяет оптимизировать орошение и снизить расход воды. Международный опыт рекомендует размещать шлюз на высоте не менее 12 м — зона покрытия увеличивается с 5 до 18 км [7].

Ограничения LPWAN: полудуплексный режим и коллизии пакетов (ALOHA-доступ) — при одновременной передаче многих датчиков доставка может затянуться до часов. Помехи в ISM-диапазоне 868 МГц снижают вероятность успешного приема ниже 90% без CSMA или frequency hopping. Duty cycle ограничен 1% (не более 36 секунд передачи в час) [8]. Климатические условия: при -40…-50°C реальный срок службы литиевых

батарей сокращается с 10 до 2–3 лет (ГОСТ Р МЭК 60086-4-2009). Конденсат в колодцах требует специальной герметизации.

Рекомендации по отраслям: нефтегаз — частная сеть LoRaWAN (независимость от оператора, дальность, но не для ПАЗ); ЖКХ — NB-IoT (проникновение, ГИС ЖКХ); сельское хозяйство — LoRaWAN + солнечная панель (низкая стоимость, отсутствие покрытия). Перспективы — гибридные шлюзы с поддержкой LoRaWAN + NB-IoT + 5G RedCap (чипы Semtech LR1121, Qualcomm QCX315), что позволит создавать единые телеметрические сети без «островов» протоколов.

Проектирование LPWAN-сети для распределенных технологических объектов требует формализованного инженерного подхода, включающего расчет бюджета радиолинии (link budget) и энергетического баланса узла. Бюджет радиолинии для LoRaWAN на частоте 868 МГц в условиях открытой местности рассчитывается по модели распространения радиоволн ITU-R P.526 (дифракция на препятствиях) с поправками на тип ландшафта. Типовые значения: чувствительность приемника шлюза при использовании SF12 (расширение 12) составляет -137 дБм, мощность передатчика датчика — +14 дБм (25 мВт). Максимально допустимые потери в тракте = 14 - (-137) = 151 дБ. При типовых потерях в атмосфере и кабелях (3 дБ) и запасе на замирания (10–15 дБ) максимальная дальность в условиях «чистого поля» достигает 15–20 км. В городской застройке или лесистой местности потери увеличиваются до 30–40 дБ, что сокращает дальность до 2–5 км. Для NB-IoT бюджет линии выше на 5–8 дБ за счет более низкой рабочей частоты (700–900 МГц) и механизма повторов, что позволяет «пробивать» дополнительные перекрытия.

Энергетический расчет датчика LPWAN выполняется на основе профиля потребления: ток в режиме сна (2–10 мкА), ток при передаче (80–150 мА при +14 дБм), длительность передачи (1–3 секунды на пакет) и периодичность. Например, для датчика с батареей 19 А·ч (типоразмер D, литий-тионилхлорид), передающего один пакет в час по 2 секунды, средний ток потребления = (120 мА × 2 с / 3600 с) + 5 мкА ≈ 0,071 мА. Расчетный срок службы = 19000 мА·ч / (0,071 мА × 24 × 365) ≈ 30 лет — лабораторная оценка. Однако с учетом саморазряда батареи (до 1% в год), падения емкости на холоде и работы в режиме «прослушивание» окон приема (дополнительные 10–20 мА на 10–20 мс каждые 30 секунд для Class A), реальный срок сокращается до 5–10 лет. Для практических расчетов рекомендуется использовать коэффициент запаса 3–5.

Интеграция LPWAN с верхними уровнями АСУ ТП и корпоративными системами

Одной из ключевых проблем внедрения LPWAN является бесшовная интеграция собираемых данных в существующие SCADA-системы (MasterScada, Trace Mode, WinCC, iFix) и корпоративные ERP/MES (1С:ERP,

SAP). Стандартная архитектура предполагает использование промышленного шлюза (например, Advantech WISE-710, Hirschmann EAGLE) или программного коннектора (например, Kepware EX с плагином LoRaWAN, промышленный драйвер Fastwel), которые преобразуют сообщения MQTT из сети LPWAN в теги OPC DA/UA и далее в SCADA. Проблема заключается в динамическом добавлении новых датчиков: в традиционной SCADA каждый тег должен быть сконфигурирован вручную (адрес, тип данных, масштабирование). При развертывании сотен датчиков это становится неприемлемо трудоемким. Решением является использование протокола Sparkplug B (и его реализаций в брокерах MQTT, например, MQTT Transmission в Ignition SCADA), который позволяет датчикам автоматически публиковать метаданные (имя устройства, единицы измерения, минимальное/максимальное значение, тип данных) при подключении к сети. SCADA-система, подписанная на специальную тему (sparkplug/birth), динамически создает теги в рантайме, что сокращает время ввода в эксплуатацию 500 датчиков с 40 человеко-часов до 2–3 часов.

Отечественные разработки и импортозамещение в области LPWAN

В условиях санкционных ограничений и политики импортозамещения на российском рынке сформировался ряд решений для LPWAN-мониторинга на отечественной элементной базе и программном обеспечении. В сегменте датчиков и радиомодемов представлены продукты компаний «НПП Микрол» (линейка МИК-Л), «РадиоИнтел» (модемы RIIoT), «СТРИЖ Телеметрия» (модемы и шлюзы LoRaWAN с российской прошивкой), использующие чипы Semtech (франко-американские), но проходящие полный цикл сборки и адаптации в РФ. Созданы первые опытные образцы на отечественных микроконтроллерах «Миландр» (серия 1986BE9x) с интеграцией программного стека LoRaWAN, но их массовое производство ожидается к 2026 году. В области сетевого ПО российская компания «Пульсар Телеком» разработала сервер LoRaWAN «Пульсар-NS», сертифицированный ФСТЭК для работы на объектах критической информационной инфраструктуры (КИИ). Он поддерживает отечественные алгоритмы шифрования (ГОСТ 28147-89, «Магма») вместо стандартного AES-128, что является обязательным требованием для государственных информационных систем и объектов ТЭК. Шлюзы LoRaWAN российской сборки (например, «Шлюз ЛоРа» от НПП «СвязьИнжиниринг») интегрируются с «Пульсар-NS» и протоколом «ГОСТ MQTT» (проект национального стандарта, 2025 г.), что позволяет строить полностью импортозамещенные системы мониторинга.

Сравнение LPWAN с альтернативными технологиями для распределенного мониторинга

При выборе технологии для мониторинга распределенных объектов LPWAN имеет конкурентов: спутниковую связь (Inmarsat, Iridium, «Гонец»),

сотовую связь стандарта 4G/5G (включая технологии NB-IoT, LTE-M) и самоорганизующиеся ячеистые сети (ZigBee, WirelessHART). Спутниковая связь обеспечивает глобальное покрытие и высокую надежность, но имеет высокую стоимость терминала (от 800 долл.) и абонентскую плату (от 30 долл./мес. за 1 МБ трафика), что ограничивает ее применение только критически важными объектами без альтернатив. Сотовая связь 4G/5G дает высокую скорость и низкую задержку, но требует наличия базовых станций и электропитания, а также потребляет 1–5 Вт, что неприемлемо для батарейных устройств. ZigBee и WirelessHART работают в диапазоне 2,4 ГГц, имеют малый радиус действия (100–300 м) и требуют большого количества ретрансляторов, что делает их непригодными для мониторинга объектов, разнесенных на километры. Таким образом, LPWAN занимает уникальную нишу: компромисс между стоимостью, дальностью и энергопотреблением, не имеющий прямых конкурентов для сценариев с периодичностью передачи от 1 минуты до 1 часа и ресурсом батареи от 2 до 10 лет.

Помимо рассмотренных отраслевых кейсов, важным аспектом внедрения LPWAN-сетей является формализованное экономическое обоснование (Total Cost of Ownership, TCO). Для распределенных объектов классическая методика оценки эффективности автоматизации должна учитывать не только прямые затраты на оборудование и монтаж, но и так называемые «невидимые» статьи расходов. При использовании проводных систем к ним относятся затраты на проектирование и экспертизу трасс (особенно в зонах вечной мерзлоты и на территориях с высоким уровнем грунтовых вод), расходы на ежегодное техническое обслуживание кабельных линий (поверка изоляции, замена муфт) и потери от простоев при аварийном разрыве кабеля (время восстановления может достигать нескольких суток). Для LPWAN-решений, напротив, основные затраты концентрируются на этапе развертывания (закупка шлюзов и датчиков, пусконаладка), а операционные расходы минимальны — замена батарей раз в 3–10 лет и периодический контроль радиопокрытия. Опыт ПАО «Сургутнефтегаз» (пилот на 300 скважинах, 2023–2024 гг.) показал, что трехлетнее TCO частной сети LoRaWAN составляет около 18% от TCO проводной системы и 42% от TCO на базе спутниковых терминалов Inmarsat.

Регуляторные требования в Российской Федерации накладывают дополнительные ограничения на использование LPWAN. Для частных сетей LoRaWAN в диапазоне 868 МГц действуют нормы ГКРЧ (Государственной комиссии по радиочастотам), ограничивающие эквивалентную изотропно-излучаемую мощность (ЭИИМ) значением 25 мВт для стационарных устройств и 10 мВт для носимых. Для развертывания сети на территории более 1 км² не требуется получения индивидуального разрешения, но необходимо уведомление радиочастотного центра (РЧЦ) субъекта РФ. Для NB-IoT, как

части сети общего пользования, предприятие не должно получать частотные разрешения, но обязано заключать договор с оператором, который предоставляет канал с SLA (Service Level Agreement), включающим гарантированную доступность (обычно 99,5–99,9%). При использовании NB-IoT для передачи данных с приборов учета в ГИС ЖКХ дополнительно требуется сертификация средств криптографической защиты (поскольку передаются персональные данные граждан), что увеличивает стоимость конечного устройства на 15–30%.

Важной инновацией последних двух лет является применение LPWAN-сетей для мониторинга «неохраняемых» объектов нефтегазовой инфраструктуры — линейных задвижек, сигнализаторов давления на межпромысловых трубопроводах, автоматических газораспределительных пунктов (АГРП). Для таких объектов критичен не только сбор данных, но и возможность дистанционного управляющего воздействия (например, закрыть задвижку при падении давления ниже порога). Поскольку LoRaWAN Class C (постоянно открытый прием) потребляет слишком много энергии, а Class B (синхронизированные окна приема) чувствителен к точности времени, инженерные компании разрабатывают гибридные схемы: датчик работает в Class A (экономичный режим с двумя короткими окнами приема после каждой передачи), а управляющая команда ставится в очередь на брокере и отправляется в момент плановой передачи данных. Такое решение, внедренное в проекте «Газпром автоматизация» (2024 г.) на 450 линейных задвижках, обеспечило время выполнения команды от 45 секунд до 4 минут при среднем энергопотреблении 0,5 мкА в режиме сна, что оказалось приемлемым для технологических процессов с инерционностью более 10 минут.

Наконец, отдельного внимания заслуживает вопрос резервирования каналов связи в LPWAN-системах для объектов критической инфраструктуры (магистральные нефтепроводы, водозаборы питьевого качества, системы раннего обнаружения утечек). Методика, рекомендованная Ростехнадзором (письмо № 07-03-056 от 15.03.2023), требует для объектов I и II классов опасности наличия двух независимых каналов телеметрии. В конфигурации с LoRaWAN в качестве основного канала резервным может выступать спутниковый терминал (включаемый только при потере связи с шлюзом) или GSM-модем с передачей SMS. Для NB-IoT резервирование часто реализуется через переход на LoRaWAN при выходе из строя базовой станции оператора, что требует наличия на объекте двухмодульного радиомодема (поддерживающего обе технологии). Такие устройства уже представлены российским производителем «СТРИЖ Телеметрия» (модель S-300D) и обеспечивают автоматическое переключение каналов с временем восстановления связи менее 60 секунд.

Для объективной оценки целесообразности внедрения LPWAN-мониторинга на распределенных объектах необходимо выполнить расчет показателей ROI (Return on Investment), NPV (Net Present Value) и срока окупаемости (Payback Period) с учетом всех факторов затрат и выгод. Рассмотрим типовое нефтяное месторождение со 120 скважинами, разнесенными на площади 150 км², где ранее использовался ежемесячный ручной объезд. Базовые исходные данные для расчета: стоимость одного LoRaWAN-датчика давления и температуры с радиомодулем и батареей — 18 500 руб. (серийная закупка 120 шт.), стоимость промышленного шлюза LoRaWAN (с учетом монтажа на вышке ДНС) — 145 000 руб., затраты на монтаж и пусконаладку 120 точек — 480 000 руб. (из расчета 4000 руб. за точку), серверное ПО (ChirpStack Enterprise + драйвер для SCADA) — 350 000 руб. Итого капитальные затраты (CAPEX): 120 × 18 500 + 145 000 + 480 000 + 350 000 = 2 220 000 + 145 000 + 480 000 + 350 000 = 3 195 000 руб. Операционные затраты (OPEX) в год: замена батарей раз в 5 лет — 120 × 600 руб. = 72 000 руб., обслуживание и калибровка датчиков — 60 000 руб., поддержка ПО — 70 000 руб., итого 202 000 руб. в год (или 101 000 руб. в среднем за первые 5 лет с учетом отсрочки замены батарей).

Базовый сценарий без автоматизации: ежемесячный объезд одной бригадой из 2 человек на автомобиле УАЗ «Патриот» (расход топлива 15 л/100 км, пробег 1200 км в месяц). Затраты: зарплата бригады (2 × 45 000 × 12) = 1 080 000 руб., топливо (14400 км/год × 0,15 л/км × 55 руб/л) = 118 800 руб., амортизация автомобиля и его содержание (включая внедорожные ремонты) — 150 000 руб./год, накладные расходы и страховые взносы — 350 000 руб. Итого 1 698 800 руб./год. Дополнительно — потери от простоев скважин, которые не были обнаружены вовремя (в среднем 120 часов простоя на скважину в год из-за невыявленных отклонений), что при тарифе 15 000 руб./час простоя для всех скважин дает убыток 120 × 120 × 15 000 = 216 000 000 руб. Однако для консервативного расчета окупаемости самой системы мониторинга корректнее учитывать только прямые операционные затраты на объезд и обслуживание, так как предотвращенные убытки являются экономическим эффектом, но не сокращением бюджета. Чистая годовая экономия на объездах и обслуживании (без учета стоимости недополученной нефти) = 1 698 800 руб. – 202 000 руб. = 1 496 800 руб. Простой срок окупаемости CAPEX (3 195 000 руб. / 1 496 800 руб.) ≈ 2,14 года (около 26 месяцев). Если же учесть экономию от предотвращенных простоев (даже 10% от расчетной суммы, то есть 21,6 млн руб.), окупаемость составляет менее 2 месяцев. Для типового проекта ЖКХ (например, 1000 водопроводных колодцев) срок окупаемости NB-IoT-системы мониторинга оценивается в 1,5–2,5 года в зависимости от тарифов оператора. Таким образом, даже при самом консервативном сценарии (учет только замены ручных объездов) LPWAN-

мониторинг окупается менее чем за 3 года, что соответствует критериям эффективности для большинства промышленных предприятий.

Цифровая трансформация мониторинга на базе LPWAN — объективная необходимость для отраслей с распределенной инфраструктурой. LoRaWAN и NB-IoT дополняют друг друга, закрывая разные сценарии. Правильный выбор технологии, учет ограничений и интеграция с существующими АСУ ТП позволяют снизить операционные риски, повысить управляемость и получить конкурентные преимущества. Инвестиции в LPWAN — это не ИТ-расходы, а вклад в устойчивость и эффективность бизнеса.

Список литературы:

1. Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M. Low Power Wide Area Networks: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2017. – Vol. 19, No. 2. – P. 855–873. DOI: 10.1109/COMST.2017.2652320.
2. ГОСТ Р 58072-2018. Системы автоматизации зданий и сооружений. Протоколы беспроводной связи нижнего уровня. – М.: Стандартинформ, 2018. – 24 с.
3. Марисов Д.А., Зацепин А.Ю., Марин Е.А., Терлеев А.В., Ларионова М.Ю. Интернет вещей в нефтегазовой сфере: анализ технологии LoRaWAN и возможности прикладного применения // PROнефть. Профессионально о нефти. 2019. № 2(4). С. 76–80.
4. СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84. – М.: Минрегион РФ, 2012. – 78 с.
5. Капанский А.А. Использование технологии интернета вещей для информационного обеспечения процессов управления и мониторинга в системах водоснабжения // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого. 2024. № 1(96).
6. Блохина С.Ю., Блохин Ю.И. Интеллектуальное земледелие на основе Интернета вещей // Земледелие. 2020. № 7. С. 7–13.
7. Singh R., Verma A., Kumar S. IoT in Agriculture: Designing a LoRaWAN-based Wireless Sensor Network // 2022 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom Workshops). – 2022. – P. 1–6. DOI: 10.1109/PerComWorkshops53856.2022.9767268.
8. LoRaWAN™ Link Layer Specification 1.0.4. – LoRa Alliance, 2020. – 82 p

УДК 004.932:621.386.8

Цой Д. О.
Научный руководитель: Ярушев С. А., канд. техн. наук, доцент
Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, Москва, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ YOLOV8 ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ НА РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКАХ

Аннотация. Данная работа посвящена определению оптимальной конфигурации модели нейронной сети для распознавания дефектов электронных компонентов на рентгеновских снимках, которая может быть внедрена на предприятиях радиоэлектронной и ракетно-космической промышленности с целью повышения скорости, объективности и точности отбраковки дефектных изделий. Рассматривается проблема субъективности и низкой производительности ручного визуального анализа рентгенограмм, что обосновывает необходимость перехода к автоматизированным методам контроля. В работе решается задача выбора наилучших параметров модели как основы для такой системы в будущем. В ходе работы был приведён обзор физических основ рентгеновского контроля и типовых дефектов электронных компонентов. Создан размеченный датасет из реальных рентгеновских изображений. Для дальнейшего сравнения были отобраны модели по критериям ожидаемой точности, времени инференса и потребления видеопамяти. Для каждой модели заданы и обоснованы гиперпараметры и наборы аугментаций, которые адаптированы под полутоновые рентгеновские снимки. Обучение и тестирование выполнены на едином датасете. Был проведен сравнительный анализ результатов тестирования обученных моделей. На его основе была выбрана оптимальная конфигурация, рекомендованная для промышленного входного контроля.

Ключевые слова: Рентгеновский контроль, электронные компоненты, дефекты, компьютерное зрение, YOLOv8, детекция объектов, аугментация данных.

Введение

В условиях стремительного развития радиоэлектронной промышленности обеспечение надёжности выпускаемой продукции выходит на первый план, делая процедуру приёмочного контроля электронных компонентов одним из наиболее ответственных этапов производственного цикла [1]. Наибольшую сложность представляет обнаружение внутренних неисправностей, которые невозможно зафиксировать при оптическом осмотре: микротрещины в керамических корпусах, посторонние включения, газовые раковины, а также аномалии паяных контактов (перемычки, недостаточное смачивание, отсутствие шариковых выводов) и отклонения в позиционировании деталей [2, 3]. Рентгенография традиционно выступает ведущим методом неразрушающего контроля для диагностики подобных

отклонений. Однако ручной анализ снимков характеризуется рядом системных недостатков: высокой степенью субъективности, прямым влиянием опыта и психофизиологического состояния инспектора, ограниченной производительностью и отсутствием единой цифровой базы результатов [4]. При массовом производстве, особенно в секторах авиационно-космической, оборонной, медицинской и автомобильной техники, указанные факторы формируют критическое замедление процесса приёмки и увеличивают вероятность выхода из строя готовых изделий в эксплуатации.

Альтернативой традиционному подходу выступает внедрение алгоритмов глубокого обучения. Семейство моделей YOLO зарекомендовало себя как эффективный инструмент, сочетающий высокую точность классификации с вычислительной скоростью, что открывает возможности для их встраивания в автоматизированные линии контроля. Однако прямое использование базовых версий нейросетей на рентгенограммах электроники часто даёт неудовлетворительные результаты вследствие игнорирования особенностей исходных данных: монохромной палитры, широкого динамического диапазона, технологических артефактов съёмки и нестабильности расположения элементов. Для достижения практической эффективности необходима адаптация алгоритмической базы к физическим принципам рентгеновской визуализации, а также тщательная оптимизация гиперпараметров под задачу выявления микроскопических отклонений.

В рамках данного исследования проводится поиск оптимальных настроек архитектуры YOLOv8 для идентификации дефектов на рентгеновских снимках. Автоматизация диагностики позволит перейти к объективному, воспроизводимому и высокопроизводительному мониторингу, минимизировав влияние человеческого фактора и обеспечив экономическую выгоду за счёт сокращения расходов на устранение брака и защиты репутации производителя. Разрабатываемое решение объединяет методы промышленной рентгенологии, компьютерного зрения и машинного обучения, что подчёркивает его междисциплинарную природу и высокую прикладную ценность для предприятий микроэлектронной отрасли.

Рентгеновский контроль

Тенденция к миниатюризации электронных узлов и массовому применению технологий поверхностного монтажа (BGA, QFN, CSP) полностью исключает возможность визуальной проверки скрытых контактных групп [3]. В этой ситуации рентгеновская диагностика сохраняет статус безальтернативного метода неразрушающего контроля, обеспечивающего визуализацию внутренней топологии изделий без нарушения их целостности [2].

Физический фундамент методики базируется на свойстве рентгеновских фотонов проникать сквозь вещества с различной плотностью. Данное

излучение представляет собой электромагнитные волны с длиной 0,01–10 нм и энергией квантов в пределах 0,1–100 кэВ, располагаясь в спектре между ультрафиолетом и гамма-излучением [5].

Входной контроль электронных компонентов

Приёмочная проверка элементной базы выступает обязательным технологическим звеном, гарантирующим надёжность конечных устройств в критически важных отраслях. Её главная задача — отбраковка контрафактных, механически повреждённых или несоответствующих спецификации деталей до этапа монтажа [3]. Рентгенодиагностика в этом процессе решает задачи верификации подлинности, оценки сохранности внутренних цепей (обрывы проводников, сколы кристаллов, газовые пустоты) и подтверждения соответствия внутренней архитектуры проекту [2]. Оформление результатов регламентируется отраслевыми стандартами MIL-STD-883 и ASTM E2737 [6, 7]. Критерии отбраковки включают расхождения фактической структуры с конструкторской документацией, нарушение ориентации чипа, наличие разрывов или коротких замыканий, инородные включения, дефекты герметизации и аномалии внутренних паяных контактов [3, 6]. Таким образом, рентгеновский входной контроль функционирует как первичный барьер, блокирующий установку неисправных компонентов в ответственные системы.

Основы компьютерного зрения в задачах технического контроля качества

Ручной анализ рентгенограмм ограничен человеческим фактором: субъективностью оценок, низкой скоростью обработки и зависимостью от уровня усталости специалиста. Использование свёрточных нейронных сетей (СНС) позволяет формализовать процедуру, получая воспроизводимые количественные метрики, сопоставимые по точности с заключениями экспертов [8]. В зависимости от постановки задачи применяются три класса архитектур: классификация (бинарное решение «годен/брак» для всего кадра), детекция объектов (совмещение поиска и категоризации дефектов с помощью ограничивающих рамок) и семантическая сегментация (послойная классификация каждого пикселя). Для инспекции электронных модулей наибольшей эффективностью обладает детекция, поскольку она точно указывает координаты аномалий и определяет их класс, в отличие от глобальной классификации или ресурсоёмкой пиксельной разметки.

Ключевым препятствием для внедрения ИИ остаётся дефицит размеченных промышленных датасетов. Данная трудность преодолевается за счёт трансферного обучения и специализированных методов аугментации, учитывающих физику рентгеновской съёмки. Поскольку снимки являются градационными, цветовые трансформации исключаются. Вместо них применяются геометрические преобразования (повороты, сдвиги, изменение

масштаба) и корректировка яркости, имитирующая колебания экспозиции. Композиционные алгоритмы (mosaic, mixup) улучшают распознавание мелких дефектов, тогда как физически некорректные операции (перспективные искажения, вертикальное зеркальное отражение) запрещены для сохранения геометрии аномалий. Интеграция подобных систем в технологические цепочки требует эмпирического подбора архитектуры нейросети, что и определяет цель проводимого исследования.

Обучение модели. В данном разделе описывается процесс разработки нейросетевой модели для обнаружения дефектов электронных компонентов на рентгеновских снимках. Разработка включает выбор архитектуры, подготовку данных, настройку параметров обучения, реализацию программного кода и анализ полученных результатов.

Обучение модели детекции дефектов электронных компонентов на рентгеновских снимках выполнялось на GPU NVIDIA RTX 4060 с 8GB видеопамяти.

Формирование датасета. В качестве объектов для распознавания в данной работе выбраны два распространенных дефекта, выявляемых на рентгеновском контроле: «трещины» и «посторонние частицы» в конденсаторах.

Датасет сформирован из рентгеновских снимков, включая изображения без дефектов. Разметка выполнена вручную в формате YOLO (инструмент LabelImg) с указанием ограничивающих прямоугольников. Датасет разделён на обучающую, валидационную и тестовую выборки в соотношении 70:15:15. Организация данных соответствует требованиям YOLO: отдельные папки train, val, test с изображениями и текстовыми файлами разметки, координаты нормализованы.

Выбор архитектур. Для автоматизированной дефектоскопии на конвейере выбрана архитектура YOLOv8 (Ultralytics) как современный индустриальный стандарт одностадийного детектора. Она сочетает высокую скорость обработки (инференс за один проход сети) с гибкой настройкой гиперпараметров, поддержкой адаптивных оптимизаторов и встроенными механизмами аугментации. Альтернативные подходы либо уступают в скорости при сопоставимой точности, либо требуют избыточных вычислительных ресурсов, что несовместимо с требованиями поточного контроля.

Проанализированы все версии YOLOv8. Их сравнительный анализ представлен в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение архитектур YOLOv8 для задачи детекции дефектов на рентгеновских снимках

Модель	**Число параметров**	**Время инференса***	**Ожидаемая точность (mAP@50-95)****
YOLOv8n (nano)	3,2 млн	0,99 мс	37,3 %
YOLOv8s (small)	11,2 млн	1,20 мс	44,9 %
YOLOv8m (medium)	25,9 млн	1,83 мс	50,2 %
YOLOv8l (large)	43,7 млн	2,39 мс	52,9 %
YOLOv8x (xlarge)	>68 млн	3,53 мс	53,9 %

* Время инференса измерено на серверном графическом ускорителе NVIDIA A100 с использованием оптимизации TensorRT и точности вычислений FP16, при разрешении входа 640×640 пикселей и размере пакета 1 [9, 10].
** Метрика mAP@50-95 вычислена на валидационной выборке датасета MS COCO и отражает усреднённую точность детекции при порогах перекрытия (IoU) от 0,5 до 0,95.

Базовые метрики в таблице 1 получены в оптимизированной среде (NVIDIA A100, TensorRT, FP16). В данном исследовании обучение и инференс выполняются на потребительской GPU NVIDIA RTX 4060 (8 ГБ VRAM) с использованием фреймворка PyTorch и аппаратного ускорения на базе CUDA 12.1 и cuDNN 8.9; выбранная комбинация версий гарантирует совместимость и максимальную производительность в рамках стандартного стека разработки. Специализированные методы оптимизации инференса (TensorRT, квантование) не применялись, чтобы оценить «чистую» эффективность архитектур в условиях, типичных для развёртывания на предприятиях. При переходе к разрешению 864×864 пикселей вычислительная сложность свёрточных сетей возрастает нелинейно, что усиливает разницу в задержках между версиями.

YOLOv8n отклонена: недостаточная ёмкость сети приводит к систематическим пропускам микродефектов (3–5 пикселей), что недопустимо для входного контроля.

YOLOv8s принята как базовая референсная модель. Задаёт нижнюю границу вычислительных затрат и позволяет оценить прирост точности при масштабировании.

YOLOv8m выбрана в качестве целевой архитектуры. Увеличение глубины и ширины сети улучшает извлечение признаков мелких аномалий, при этом модель остаётся в пределах доступной VRAM при разрешении 864×864 и сохраняет приемлемое быстродействие.

YOLOv8l/x исключены: требуют >10–12 ГБ VRAM, что вынуждает уменьшать размер батча, дестабилизируя слои нормализации и замедляя сходимость. Кратный рост времени инференса и маржинальный прирост точности (1–2 %) не оправдывают затраты и риски для конвейерной инспекции.

Таким образом, для экспериментального сравнения отобраны две конфигурации: YOLOv8s и YOLOv8m. Обучение обеих моделей на идентичном датасете с единым протоколом валидации позволит объективно оценить влияние масштаба сети и разрешения входа на качество детекции и выбрать решение, удовлетворяющее промышленным требованиям по полноте обнаружения дефектов и допустимой задержке обработки.

YOLOv8s обучалась с входным разрешением 640×640, размером батча 16 (аппаратный лимит GPU 8 ГБ), 200 эпохами и ранней остановкой через 30 эпох. Использовался стандартный SGD с начальной скоростью обучения 0,01, линейным затуханием (lrf = 0,01) и L2-регуляризацией (weight_decay = 0,0005).

Для YOLOv8m разрешение увеличено до 864×864 для улучшения детекции мелких частиц (5–7 пикселей), что ограничило батч до 10. Обучение проведено на 250 эпохах с расширенным терпением (patience = 70) для выхода из плато; фактическая остановка наступила на 194-й эпохе. Оптимизатор заменён на AdamW с пониженной начальной скоростью обучения 0,001 (во избежание колебаний при 0,01), косинусным затуханием (lrf = 0,01) и аналогичной L2-регуляризацией.

Также помимо основных параметров конфигурации для второй модели был сформирован набор аугментаций, который был адаптирован под рентген. Параметры аугментаций представлены в таблице 2.

Таблица 2. Аугментации второй модели (адаптированные под рентген)

Параметр	**Значение**	**Обоснование**
hsv_h	0,0	Отключён — рентген полутоновый
hsv_s	0,0	Отключена — насыщенность не определена
hsv_v	0,2	Изменение яркости ±20% — моделирование вариаций экспозиции при съёмке
degrees	5°	Уменьшен (реальная погрешность позиционирования ≤3°)

Параметр	**Значение**	**Обоснование**
translate	0,1	Сдвиг — имитация смещения на конвейере
scale	0,4	Масштаб 0,6–1,4 — типоразмеры 0402…1206
shear	0,0	Отключён — искажает геометрию дефектов
perspective	0,0	Отключена — параллельный пучок рентгена
flipud	0,0	Отключено — нарушает полярность выводов и направленность частиц
fliplr	0,5	Допустимо — поворот в плоскости стола
mosaic	1,0	Улучшает детекцию мелких; отключение к концу
mixup	0,3	Усиленный регуляризатор
copy_paste	0,0	Отключена — нарушает физическую целостность
close_mosaic	20	Отключение за 20 эпох до конца

Цветовые преобразования отключены ввиду полутонового характера изображений; изменение яркости ограничено ±20% для имитации вариаций экспозиции. Геометрические трансформации включают поворот ±5° (компенсация позиционирования), сдвиг 10% и масштабирование 0,6–1,4 (инвариантность к типоразмерам компонентов). Сдвиг наклона, перспективные искажения и вертикальное отражение исключены как физически некорректные для параллельного пучка или нарушающие полярность выводов и направленность оседания частиц; горизонтальное отражение применяется с вероятностью 50%. Из композиционных методов мозаика активна на ранних этапах и отключается за 20 эпох до конца для стабилизации, mixup применяется в 30% случаев как регуляризатор, а copy_paste исключён для сохранения физической целостности структур. Данный комплекс аугментаций повышает обобщающую способность модели, предотвращая переобучение на ограниченном датасете.

Тестирование моделей. Для объективной оценки качества моделей проводилось тестирование на независимой выборке, изображения из которой не использовались в обучении. Оценка выполнялась по следующим метрикам: mAP50, Precision, Recall, F1-score, матрица ошибок. Тестирование реализовано на базе Ultralytics YOLOv8 с загрузкой обученной модели. Параметры

тестирования: порог IoU = 0,5, порог уверенности — минимальный (0,001) для получения полной картины. Результаты тестирования первой и второй конфигураций представлены на рисунке 1.

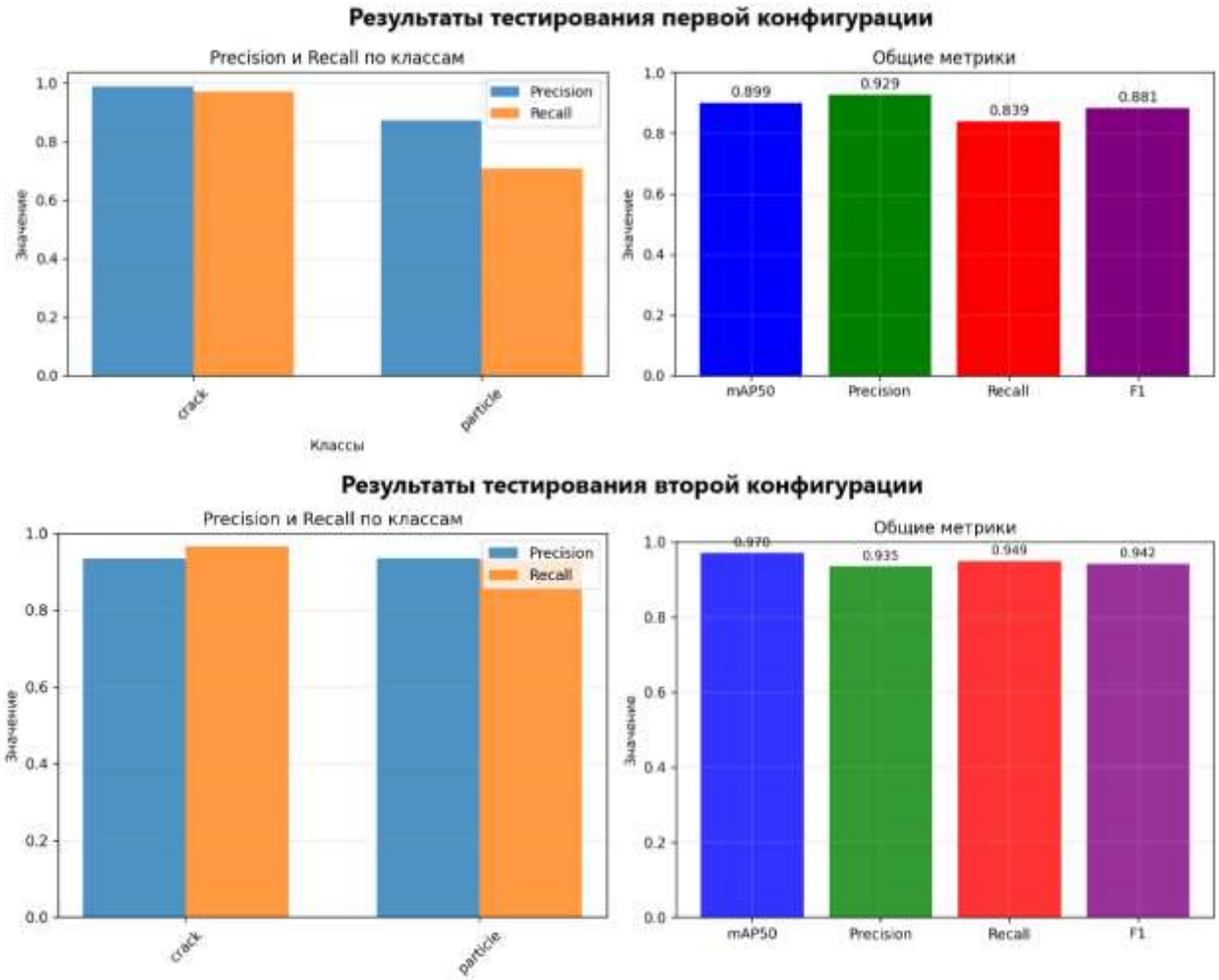


Рисунок 1. Результаты тестирований конфигураций

Результаты тестирования обеих моделей сведены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение метрик первой и второй конфигураций

Метрика	**Первая модель (YOLOv8s)**	**Вторая модель (YOLOv8m)**
mAP50	0,899	0,970
Precision (средняя)	0,929	0,935
Recall (средний)	0,839	0,949
F1-score (средний)	0,881	0,942

Метрика	Първая модель (YOLOv8s)	Вторая модель (YOLOv8m)
Precision (crack)	0,99	0,94
Recall (crack)	0,97	0,97
Precision (particle)	0,87	0,94
Recall (particle)	0,71	0,93

Как видно из таблицы, вторая модель значительно превосходит первую по всем ключевым метрикам. Наиболее критичным является прирост полноты обнаружения инородных частиц (recall по классу particle) с 71% до 93% и средней полноты с 83,9% до 94,9%. При этом время инференса второй модели составляет ~26,5 мс против ~7,9 мс у первой, что остаётся приемлемым для работы в реальном времени.

Сравнение двух моделей позволяет выделить ключевые факторы, обеспечившие превосходство второй конфигурации:

1. Архитектура: увеличение параметров с 11,2 до 25,9 млн улучшает извлечение признаков микродефектов (5–7 пикселей).
2. Разрешение: переход с 640×640 на 864×864 повышает детализацию мелких объектов.
3. Оптимизатор: замена SGD на AdamW обеспечивает устойчивую сходимость на зашумлённых рентгеновских данных.
4. Аугментации: физически обоснованный набор (Таблица 4) исключает некорректные преобразования (цвет, перспектива, вертикальный флип) и точно имитирует производственные вариации.

Выбор оптимальной конфигурации. На основе проведённого сравнительного анализа сделаны следующие выводы:

— Первая модель (YOLOv8s, 640×640, стандартные аугментации, оптимизатор SGD) признана непригодной для промышленного контроля из-за недопустимо низкой полноты по классу «инородная частица» (recall = 0,71). Несмотря на высокое быстродействие (~7,9 мс), пропуск 29% дефектов делает её использование технологически и экономически нецелесообразным.

— Вторая модель (YOLOv8m, 864×864, AdamW, аугментации, адаптированные к специфике рентгеновской съёмки) достигла mAP50 = 0,970, средней точности 0,935 и полноты 0,949. Хотя время её инференса составляет ~26,5 мс (в ~3,3 раза больше, чем у первой), данный показатель остаётся приемлемым для интеграции в конвейерные линии, а значительный прирост точности и надёжности полностью оправдывает вычислительные затраты.

Таким образом, в качестве оптимальной конфигурации для детекции дефектов на рентгеновских снимках электронных компонентов рекомендуется:
YOLOv8m, размер входного изображения 864×864 пикселя, оптимизатор AdamW, набор аугментаций согласно таблице 4 (отключены hsv_h, hsv_s, shear, perspective, flipud, copy_paste; установлены hsv_v=0,2, degrees=5°, translate=0,1, scale=0,4, fliplr=0,5, mosaic с отключением за 20 эпох, mixup=0,3). Данная конфигурация может служить основой для создания систем автоматического входного рентгеновского контроля на предприятиях радиоэлектронной промышленности.

Полученные результаты подтверждают высокую практическую пригодность системы: пропускается лишь около 5% дефектов, а доля ложной браковки не превышает 6,5%. На основе F1-кривой рекомендуется порог уверенности 0,287. Ниже представлены примеры работы данной модели. На рисунке 2 показан снимок танталового конденсатора, содержащего инородную частицу внутри корпуса. Модель уверено выделяет дефект Рисунок 3 демонстрирует обнаружение трещины в керамическом конденсаторе. Полученные результаты подтверждают работоспособность данной модели.

Рисунок 2. Обнаружение инородной частицы в корпусе конденсатора

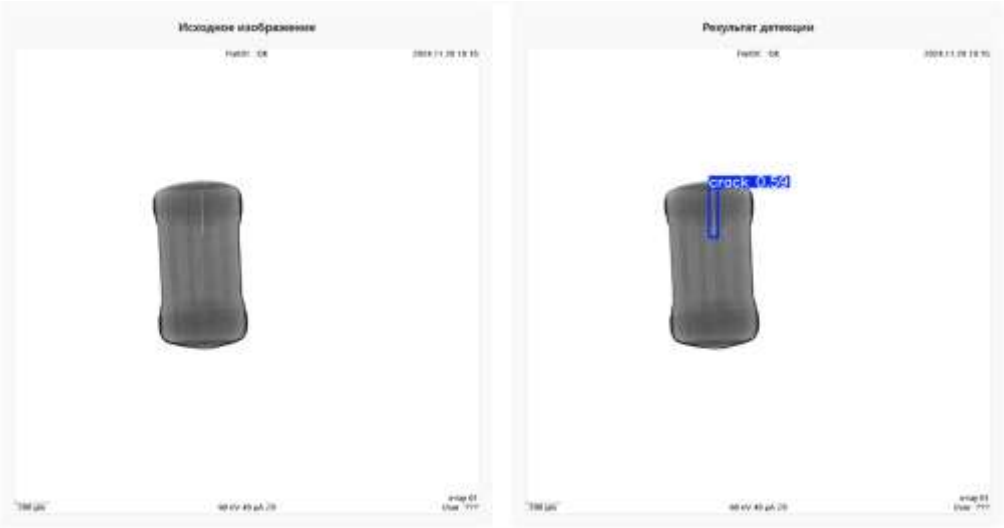


Рисунок 3. Обнаружение трещины в керамическом конденсаторе

Таким образом, обученная модель YOLOv8 удовлетворяет требованиям рентгеновского контроля электронных компонентов и готова к промышленному внедрению в систему контроля качества в качестве вспомогательного инструмента оператора.

Заключение. В данной работы было выполнено исследование, направленное на экспериментальное определение оптимальной конфигурации модели YOLOv8 для распознавания дефектов электронных компонентов на рентгеновских снимках применительно к входному контролю на предприятиях радиоэлектронной промышленности. В ходе исследования выполнен обзор физических основ рентгеновского контроля и типовых дефектов электронных компонентов, что позволило обосновать необходимость перехода от ручного визуального анализа к автоматизированным методам на базе глубокого обучения. Сформирован размеченный датасет из реальных рентгеновских изображений, содержащий два класса дефектов —трещины и инородные частицы. Он был разделением на обучающую, валидационную и тестовую выборки. Проведён предварительный отбор моделей семейства YOLOv8 по критериям ожидаемой точности, времени инференса и потребления видеопамяти: для дальнейшего сравнения приняты YOLOv8s и YOLOv8m. Для каждой из двух моделей определены и обоснованы гиперпараметры обучения (размер входного изображения, батч, оптимизатор, скорость обучения, регуляризация) и наборы аугментаций, адаптированные под природу рентгеновских снимков. Обучение и тестирование выполнены на едином датасете. На основе сравнительного анализа в качестве оптимальной рекомендована конфигурация YOLOv8m с разрешением 864×864, оптимизатором AdamW и адаптированным набором аугментаций.

Таким образом, предложенная конфигурация может служить основой для создания систем автоматического входного рентгеновского контроля на предприятиях радиоэлектронной промышленности, а приведённые обоснования — методическим ориентиром для настройки аналогичных детекторов.

Список литературы:

1. ГОСТ Р 56648-2015. База электронная компонентная для ракетно-космической техники. Входной контроль и дополнительные испытания. Общие положения. — М.: Стандартинформ, 2015. — 18 с.
2. Соснин, Ф. Р. Визуальный и измерительный контроль / Ф. Р. Соснин // Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 2006. — Т. 1, кн. 1. — 424 с
3. ГОСТ 24715-81. Соединения паяные. Методы контроля качества. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 24 с.
4. Лобач, Д. И. О некоторых проблемах анализа и оценки влияния человеческого фактора на безопасность технических систем / Д. И. Лобач // Онтология проектирования. — 2023. — Т. 13, № 4. — С. 615–624. — DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-615-624.
5. Мазуров, А. И. О технологиях рентгеновских систем для контроля электронных компонентов / А. И. Мазуров, Н. Н. Потрахов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — 2019. — Т. 22, № 3. — С. 113–121. — DOI: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-113-121.
6. MIL-STD-883K. Test Method Standard. Microcircuits. — Washington: U.S. Department of Defense, 2022. — 1200 p.
7. ASTM E2737-23. Standard Practice for Digital Detector Array Performance Evaluation and Long-Term Stability. — West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023. — 18 p. — DOI: 10.1520/E2737-23.
8. LeCun, Y. Deep learning / Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton // Nature. — 2015. — Vol. 521, no. 7553. — P. 436–444. — DOI: 10.1038/nature14539.
9. YOLOv8 documentation [Электронный ресурс] // Ultralytics: официальный сайт. — URL: https://docs.ultralytics.com/models/yolov8/ (дата обращения: 20.05.2026).
10. YOLOv8 Model Documentation [Электронный ресурс] // GitHub. — URL: https://github.com/ultralytics/ultralytics/blob/main/docs/en/models/yolov8.md (дата обращения: 20.05.2026).

УДК 004.75:004.45

Курбатова М. А., Копылова Я. А.
МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

СОВРЕМЕННЫЕ АРХИТЕКТУРНЫЕ ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Аннотация: в статье рассматриваются современные архитектурные подходы к построению распределённых информационных систем. Анализируются микросервисная, бессерверная, cloud-native, событийно-ориентированная и контейнерная архитектуры. Выделены их основные преимущества, ограничения и области применения. Особое внимание уделено роли Kubernetes, DevOps-практик и мультиоблачных решений в развитии ИТ-инфраструктуры. Сделан вывод о значимости данных подходов для повышения масштабируемости, гибкости и отказоустойчивости информационных систем.

Ключевые слова: ИТ-архитектура, распределённые информационные системы, микросервисная архитектура, cloud-native, Kubernetes, serverless, контейнеризация, контейнерная архитектура, событийно-ориентированная архитектура, Event-Driven Architecture.

Современные информационные системы развиваются в направлении распределённых и облачно-ориентированных архитектур. Это связано с необходимостью обеспечения масштабируемости, отказоустойчивости и гибкости разработки. Традиционные монолитные системы постепенно уступают место более модульным подходам, позволяющим быстро внедрять новые функции и адаптироваться к изменяющимся требованиям бизнеса [1-2].

Одним из наиболее распространённых архитектурных подходов является микросервисная архитектура. В данной модели приложение разделяется на независимые сервисы, каждый из которых отвечает за отдельную бизнес-функцию. Такой подход обеспечивает независимое масштабирование компонентов и ускоряет процесс разработки. Кроме того, отказ одного сервиса не приводит к остановке всей системы, что повышает отказоустойчивость приложения [3]. Однако микросервисная архитектура усложняет сопровождение системы, поскольку требует настройки взаимодействия между сервисами, централизованного мониторинга и управления API.

На Рисунке 1 представлен пример схемы микросервисной архитектуры.

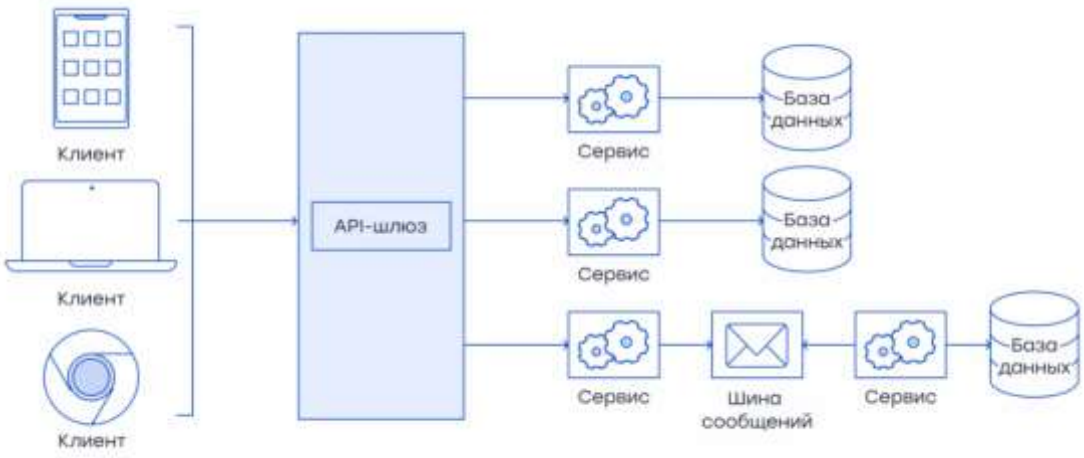


Рис.1. Схема микросервисной архитектуры: API Gateway, сервисы и базы данных

В последние годы широкое распространение получила бессерверная архитектура (Serverless). В данной модели разработчик работает только с программным кодом, а управление серверами, масштабирование и распределение ресурсов выполняет облачный провайдер [4]. Основными преимуществами serverless-подхода являются снижение затрат на инфраструктуру и автоматическое масштабирование под текущую нагрузку. Такой подход особенно эффективен для обработки событий, API-запросов и фоновых вычислений. Недостатками являются зависимость от облачного провайдера, ограничения по времени выполнения функций и проблема «холодного старта».

Значительную роль в развитии современных ИТ-систем играет cloud-native архитектура. Подобные приложения изначально проектируются для работы в облачной среде и используют контейнеризацию, CI/CD и автоматическое масштабирование [5]. Cloud-native приложения обладают высокой гибкостью и позволяют быстро выпускать обновления без остановки системы. Вместе с тем их внедрение требует высокой квалификации специалистов и сложной инфраструктуры управления.

Многие организации применяют мультиоблачный подход, предполагающий использование нескольких облачных платформ одновременно. Это позволяет снизить зависимость от одного поставщика услуг, повысить отказоустойчивость и оптимизировать расходы на инфраструктуру [6]. При этом мультиоблачные решения требуют дополнительных средств управления безопасностью и интеграцией.

Событийно-ориентированная архитектура (Event-Driven Architecture) строится вокруг обработки событий. Компоненты системы взаимодействуют не напрямую, а через брокеры сообщений и очереди событий. Такой подход обеспечивает слабую связанность сервисов и позволяет обрабатывать данные

практически в режиме реального времени [7]. Событийная модель активно применяется в банковских системах, интернет-магазинах и IoT-платформах. Однако проектирование подобных систем требует продуманной организации очередей сообщений и механизмов контроля согласованности данных.

Событийно-ориентированная архитектура представлена на Рисунке 2.

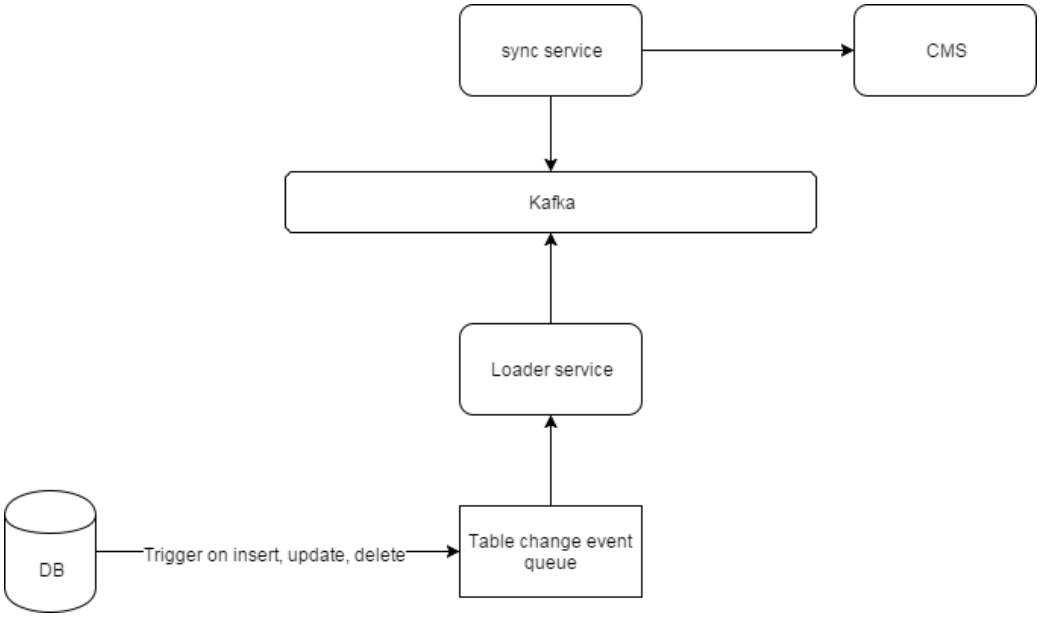


Рис.2. Пример событийно-ориентированной архитектуры

Контейнерная архитектура и системы оркестрации, такие как Kubernetes, стали стандартом для развертывания распределённых приложений. Контейнеры позволяют запускать приложение одинаково в различных средах, а Kubernetes автоматизирует масштабирование, балансировку нагрузки и восстановление после сбоев. Использование контейнеров повышает эффективность DevOps-процессов и ускоряет внедрение обновлений. Недостатком является сложность настройки и сопровождения контейнерной инфраструктуры.

Несмотря на популярность современных распределённых подходов, монолитная архитектура продолжает использоваться для небольших приложений и внутренних корпоративных систем. Её преимуществами являются простота разработки и низкие затраты на сопровождение на ранних этапах проекта. Однако при росте системы монолит становится сложным для масштабирования и модернизации.

Современные распределённые системы всё чаще строятся с использованием практик наблюдаемости (Observability) и инфраструктуры как кода (Infrastructure as Code, IaC). Увеличение количества сервисов, контейнеров и облачных компонентов существенно усложняет контроль состояния системы и поиск причин отказов. В отличие от традиционного

мониторинга, ориентированного преимущественно на сбор метрик, наблюдаемость предполагает комплексный анализ телеметрических данных, включающих метрики, журналы событий и трассировку запросов между сервисами. Такой подход позволяет оперативно выявлять узкие места производительности и анализировать причины возникновения инцидентов в распределённой среде.

Для автоматизации управления инфраструктурой широко применяются инструменты класса Infrastructure as Code, позволяющие описывать конфигурацию серверов, сетевых компонентов и облачных ресурсов в виде программного кода. Использование данного подхода обеспечивает воспроизводимость среды выполнения, уменьшает количество ошибок ручной настройки и ускоряет развёртывание новых версий приложений. Практика IaC тесно интегрируется с процессами DevOps и непрерывной поставкой программного обеспечения, что особенно актуально для cloud-native и микросервисных систем.

Дополнительно возрастает роль автоматизации процессов эксплуатации за счёт внедрения концепции GitOps, предполагающей хранение конфигурации инфраструктуры в системах контроля версий и автоматическое применение изменений. Это позволяет централизованно управлять инфраструктурой, обеспечивать прозрачность изменений и поддерживать согласованность между различными средами разработки, тестирования и промышленной эксплуатации. В совокупности применение Observability, Infrastructure as Code и GitOps формирует основу эффективного сопровождения современных распределённых информационных систем и повышает устойчивость их функционирования в условиях высокой нагрузки и частых обновлений.

Важным подходом к проектированию современных ИТ-систем является Domain-Driven Design (DDD). Данный метод предполагает построение архитектуры вокруг бизнес-домена и разделение системы на ограниченные контексты (Bounded Contexts). Использование DDD позволяет более точно определять границы микросервисов и уменьшать связанность компонентов системы [8].

Таким образом, современные архитектурные решения направлены на обеспечение гибкости, масштабируемости и устойчивости информационных систем. Наиболее востребованными в период 2020–2025 годов стали микросервисные, cloud-native и контейнерные подходы, часто применяемые совместно с событиями и serverless-технологиями. Выбор архитектуры зависит от требований проекта, объёма нагрузки и уровня зрелости инфраструктуры организации.

Список литературы:

1. Малыгин Д.С. Микросервисная архитектура в облачных системах: риски и возможности применения в 2024–2030 гг. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024;12(2). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1561 DOI: 10.26102/2310 6018/2024.45.2.029

2. Канапин Ж.С. Влияние микросервисной архитектуры на масштабируемость и отказоустойчивость корпоративных систем снабжения // CyberLeninka [Электронный ресурс]. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-mikroservisnoy-arhitektury-na-masshtabiruemost-i-otkazoustoychivost-korporativnyh-sistem-snabzheniya

3. Мухаметгалиев С.И. Микросервисная архитектура как современный подход к разработке программного обеспечения // CyberLeninka [Электронный ресурс]. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/mikroservisnaya-arhitektura-kak-sovremennyy-podhod-k-razrabotke-programmnogo-obespecheniya/viewer

4. Baldini I., Castro P., Chang K. et al. Serverless Computing: Current Trends and Open Problems // arXiv [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/1706.03178

5. Zimmermann O. Microservices Tenets: Agile Approach to Service Development and Deployment // Springer [Электронный ресурс]. — URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00450-016-0337-0

6. Petcu D. Multi-Cloud: Expectations and Current Approaches // ACM Digital Library [Электронный ресурс]. — URL: https://dl.acm.org/doi/epdf/10.1145/2462326.2462328

7. Hinze A., Sachs K., Buchmann A. Event-Based Applications and Enabling Technologies // ACM Digital Library [Электронный ресурс]. — URL: https://dl.acm.org/doi/epdf/10.1145/1619258.1619260

8. Vernon V. Effective Aggregate Design Part I: Modeling a Single Aggregate // DDD Community [Электронный ресурс]. — URL: https://www.dddcommunity.org/wp-content/uploads/files/pdf_articles/Vernon_2011_1.pdf

УДК 004.75:004.056

Григорян А. Г., Галицкий М. В.
Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО СБОРА ЗАПИСЕЙ О СОБЫТИЯХ НА ОСНОВЕ АРХИТЕКТУРЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Аннотация: *в работе рассматривается задача выбора системы централизованного сбора и анализа журналов событий для заданного класса ИТ-инфраструктуры. Предложена иерархическая методология, в которой кандидаты оцениваются по тринадцати критериям, разделённым на три группы – архитектурные, функциональные и эксплуатационные. Итоговый балл системы вычисляется как взвешенная свёртка нормированных оценок, причём весовой вектор настраивается под конкретный класс инфраструктуры. Шкала оценивания дискретна, каждой комбинации «критерий – балл» сопоставлено явное правило присвоения значения, что снижает субъективность экспертизы. Описан пошаговый алгоритм применения методологии и приведён численный пример расчёта итогового балла. Методология апробирована на шести представительных системах для трёх типовых сценариев развёртывания. Полученные результаты применимы при проектировании систем централизованного мониторинга для ИТ-инфраструктур различного масштаба.*

Ключевые слова: *системы управления журналами событий; многокритериальная методология выбора; SIEM; ELK; Grafana Loki; мониторинг ИТ-инфраструктуры; наблюдаемость; сценарии развёртывания.*

Введение

Объёмы журналов в современных распределённых системах растут опережающими темпами. Микросервисные архитектуры, оркестраторы контейнеров, сетевое оборудование и приложения генерируют сотни тысяч событий в секунду – каждое из которых потенциально содержит признаки сбоя, атаки или нарушения SLA [1]. Без централизованного сбора и обработки таких потоков любая среднего размера инфраструктура становится непрозрачной для администратора.

Регуляторные требования усиливают эту тенденцию. ГОСТ Р 57580.1 [2] и требования ФСТЭК России к подсистемам регистрации и учёта [3] прямо предписывают непрерывное протоколирование событий безопасности с возможностью последующего анализа. Сходные подходы зафиксированы и в международной практике – в частности, в рекомендациях NIST SP 800-92 [4].

Стоит отметить, что соблюдение этих требований без специализированного программного обеспечения практически невозможно: ручной анализ десятков терабайт логов в неделю – задача, выходящая за пределы человеческих возможностей.

Рынок отвечает на этот спрос обилием решений. Крупных и зрелых систем централизованного сбора логов (далее – СУЛ) сегодня более десятка. Они различаются принципиально. Одни строят полнотекстовый инвертированный индекс по всему содержимому, другие индексируют только метаданные, третьи фокусируются исключительно на транспорте и обработке. Лицензионные модели тоже разнятся – от строго коммерческих с подпиской на объём индексации до полностью открытых с самостоятельным сопровождением.

Здесь возникает следующая проблема: существующие сравнительные обзоры обычно перечисляют возможности систем по сводным таблицам [12], но не дают воспроизводимой процедуры выбора. Архитектор, перед которым стоит задача внедрения, нередко руководствуется маркетинговыми материалами поставщиков или предпочтениями команды. А цена ошибки высока: смена СУЛ после её ввода в эксплуатацию обходится дорого и почти всегда сопряжена с потерей исторических данных.

1. Задачи и архитектурные паттерны централизованного сбора логов

Прежде чем формировать методологию выбора, нужно разобраться, что вообще делает типовая СУЛ и из каких компонентов она строится. Базовое определение даёт NIST: “A log is a record of the events occurring within an organization’s systems and networks” [4]. Обобщённый конвейер обработки логов включает шесть стадий: сбор, транспорт, парсинг и обогащение, хранение и индексация, запросы и визуализация, алертинг (рис. 1).

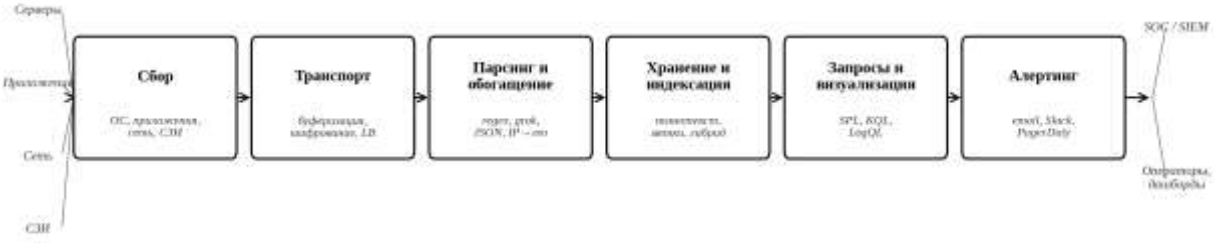


Рис. 1. Обобщённая схема конвейера обработки логов

Сбор – первая стадия. Здесь формируются сообщения от источников: системных журналов ОС, журналов приложений, сетевого оборудования, средств защиты. Сбор может быть агентным (на источнике установлен специализированный сервис) или безагентным – когда источник самостоятельно отправляет события по сетевому протоколу, чаще всего syslog или Windows Event Forwarding.

Транспорт – стадия доставки сообщений в центральное хранилище. Здесь решаются задачи буферизации (что делать, если хранилище недоступно), шифрования и аутентификации канала, балансировки нагрузки. Плохо спроектированный транспорт обнуляет любую функциональность остальных стадий: потерянное сообщение в принципе нельзя проанализировать.

Парсинг и обогащение превращают сырое сообщение в структурированную запись. Парсер выделяет поля по шаблону (regexp, grok, JSON-парсер), а на стадии обогащения к записи добавляется контекст – геолокация по IP, имя хоста по адресу, метки источника. Качество парсинга прямо определяет, насколько эффективно работают последующие запросы.

Хранение и индексация – определяющая стадия с точки зрения архитектуры. Возможны три модели:

- полнотекстовая индексация строит инвертированный индекс по содержимому каждого поля. Поиск по произвольному слову работает быстро, но индексирование само по себе требует ресурсов и места. Это путь Elastic Stack, OpenSearch, Splunk;
- индексация по меткам (label-based) сохраняет содержимое логов в виде сжатых блоков, индексирует же только небольшой набор предопределённых меток (имя сервиса, окружение, уровень). Хранение получается значительно дешевле, поиск по содержимому требует полного сканирования отобранных по меткам блоков. Так работает Grafana Loki [5];
- гибридная модель комбинирует подходы: индексирует часть полей и хранит остальное как сжатый текст.

Запросы и визуализация – это интерфейс пользователя. Здесь критична выразительность языка запросов: SPL у Splunk, KQL/Lucene у Elastic, LogQL у Loki. Чем богаче язык, тем сложнее задачи можно решать без выгрузки данных вовне.

Алертинг – последняя стадия. Система должна уметь сигнализировать о наступлении заданных условий: превышении частоты ошибок, появлении подозрительных шаблонов, нарушении SLO. Качество алертинга определяется не только наличием самой функции, но и средствами борьбы с шумом – группировкой, дедупликацией, эскалацией [16].

Дополнительно к стадиям конвейера полезно различать архитектурные паттерны развёртывания: агентный push (агент отправляет на коллектор);

агентный pull (коллектор опрашивает агента – модель, близкая к Prometheus); sidecar – контейнер-агент рядом с основным контейнером в Kubernetes [15]; безагентный сбор по syslog или WEF. В контейнерных средах sidecar и DaemonSet-варианты дают преимущество в управлении конфигурацией, но повышают накладные расходы по памяти на узел. Безагентный сбор удобен для устаревшего оборудования, где установка агента невозможна, проигрывая, однако, в надёжности доставки.

Существенно и то, насколько СУЛ дружит со структурированными форматами логов. JSON, CEF, ECS, OpenTelemetry Logs – современные стандарты, упрощающие парсинг. Системы с глубокой нативной поддержкой этих форматов экономят разработчикам недели работы по написанию парсеров.

2. Краткая характеристика сравниваемых систем

Для апробации методологии отобраны шесть систем, представляющих разные ниши и архитектурные подходы.

Elastic Stack (ELK). Состоит из Elasticsearch (хранилище и индекс), Logstash (парсинг и обогащение) и Kibana (UI). Дополнительно – семейство Beats, лёгкие агенты сбора. Полнотекстовая индексация на базе Apache Lucene. Лицензия с 2021 года двойная: SSPL/Elastic License, что усложняет коммерческое использование без оплаты [6]. Сильна в наблюдаемости и SIEM-сценариях. Существует форк OpenSearch под лицензией Apache 2.0, поддерживаемый AWS [7] – по большинству оценок методологии практически не отличается от ELK, поэтому далее рассматривается совместно с ним.

Grafana Loki. Принципиально иной подход – индексация только по меткам, основное содержимое хранится в сжатых чанках на объектном хранилище (S3, GCS, MinIO) [5]. Это даёт радикальное снижение стоимости хранения, иногда на порядок. Цена – в потере скорости произвольного полнотекстового поиска.

Graylog. Open-source решение с фокусом на сценариях ИБ. Использует Elasticsearch/OpenSearch как хранилище и MongoDB для метаданных. Сильные стороны – встроенная корреляция событий, ролевая модель, готовые dashboards для типовых задач [8].

Splunk. Коммерческая платформа с собственным форматом индекса и языком запросов SPL. Считается отраслевым стандартом для крупных организаций. Лицензирование традиционно по объёму индексации в день, что делает решение дорогостоящим на больших объёмах [9].

Fluentd / Fluent Bit. Проекты CNCF, выполняющие роли коллекторов и преобразователей. Хранилищем не являются – обычно используются в связке с одной из систем выше [10]. Fluent Bit написан на C, отличается крайне низким потреблением ресурсов.

Vector. Высокопроизводительный конвейер observability-данных, написанный на Rust [11]. Поддерживает логи, метрики и трассировки в едином потоке. Архитектурно – преобразователь, не хранилище.

Заметим, что Fluentd/Fluent Bit и Vector сравнимы между собой, но не вполне сопоставимы с ELK или Splunk. При применении методологии они оцениваются как самостоятельные решения с пониманием того, что в реальном развёртывании они дополняются хранилищем.

3. Предлагаемая методология выбора

3.1. Принципы и допущения

Методология построена на трёх принципах.

Воспроизводимость. При одних и тех же входных данных два независимых эксперта должны получать совпадающий результат – иначе процедура теряет смысл [13].

Разделимость измерений. Архитектурные, функциональные и эксплуатационные характеристики оцениваются отдельно: смешение приводит к двойному учёту одних и тех же свойств.

Настраиваемость под класс инфраструктуры. Один и тот же набор критериев получает разные веса в зависимости от того, для какой среды выбирается система. Малая инфраструктура ценит простоту; крупный энтерпрайз – корреляцию и аудит; контейнерная среда – нативную интеграцию с Kubernetes.

Допущения. Методология ориентирована на универсальные СУЛ open-source и коммерческого сегмента. Узкоспециализированные SIEM-системы с фиксированными контрактами поставщика выходят за её пределы – для них требуется отдельный набор критериев. Не оцениваются также комплекты ПО, поставляемые исключительно как managed-сервис без возможности развёртывания у заказчика.

3.2. Иерархическая система критериев

Предлагаемый набор включает 13 критериев, сгруппированных в три измерения.

Архитектурные критерии (А): А1 – модель индексации (полнотекстовая, по меткам, гибридная, отсутствует); А2 – состав компонентов и зависимости (количество и сложность сервисов, требуемых для работы; внешние зависимости – СУБД, очереди); А3 – модель развёртывания (поддержка моноинсталляции, кластерной установки, управляемого облака); А4 – поддержка контейнерных сред (готовые Helm-чарты, операторы, нативная работа с Kubernetes API).

Функциональные критерии (Ф): Ф1 – поддерживаемые форматы и парсинг (JSON, CEF, ECS, OTel Logs, наличие готовых парсеров); Ф2 – выразительность языка запросов (поддержка агрегации, регулярных выражений, оконных функций, joins); Ф3 – встроенный алертинг

(возможности уведомлений, поддержка каналов: email, Telegram, PagerDuty, webhooks); Ф4 – корреляция событий (поиск по нескольким источникам, цепочки правил, временные окна); Ф5 – ролевая модель и аудит (RBAC, поле-уровневые права, аудит действий пользователей).

Эксплуатационные критерии (Э): Э1 – оценочное потребление ресурсов на единицу EPS (CPU, RAM, диск); Э2 – горизонтальная масштабируемость (способность расти добавлением узлов без принципиальной перестройки); Э3 – стоимость владения (лицензии плюс ресурсы; включая стоимость хранения за год при типовом ретеншене); Э4 – порог входа и качество документации (время от установки до первого продуктивного использования).

3.3. Шкала оценивания

Чтобы избежать произвольности, оценки выставляются по дискретной пятибалльной шкале со значениями {0; 0,25; 0,5; 0,75; 1}. Каждой комбинации «критерий – значение» соответствует явное правило (табл. 1). Эксперт не присваивает балл «по ощущениям» – он сверяется с правилом.

Например, для критерия А1 «модель индексации» правила формулируются так: 1,0 – полнотекстовая или гибридная индексация со свободным запросом по содержимому; 0,75 – полнотекстовая, но с заметными ограничениями (например, нет регулярных выражений); 0,5 – индексация по меткам с возможностью фильтрации; 0,25 – индексация только метаданных; 0 – индексация отсутствует.

Таблица 1. Фрагмент шкалы оценивания (правила присвоения значений)

Критерий	0	0,25	0,5	0,75	1,0
А1	Нет	Только метаданные	По меткам	Полнотекст. с огранич.	Полнотекст./гибрид.
Ф2	Нет языка	Только фильтры	Агрегация, regex	+ оконные функции	+ joins, SPL/SQL
Э3	Закрытая, дорого	Коммерч. подписка	Открытая + ресурсы	Открытая, экономно	Открытая, минимум

3.4. Свёртка оценок

Итоговый балл системы рассчитывается как взвешенная сумма нормированных оценок:

$S_j = \Sigma\, w_i \cdot c_{ij}$, (1)

где S_j – итоговая оценка j-й системы; w_i – вес i-го критерия для конкретного сценария; $c_{ij} \in [0; 1]$ – нормированная оценка j-й системы по i-му критерию; n = 13 – общее число критериев. Веса нормируются условием Σw_i =

1, что даёт удобное свойство: итоговый балл S_j также лежит в диапазоне [0; 1] и интерпретируется как «доля идеального соответствия» сценарию.

3.5. Алгоритм применения методологии

Шесть последовательных шагов (рис. 2).

Шаг 1. Описание целевой инфраструктуры. Размер парка хостов, ожидаемый поток событий (EPS), требования регуляторов, среда исполнения, наличие команды эксплуатации.

Шаг 2. Определение вектора весов. Эксперт назначает вес каждому из 13 критериев так, чтобы их сумма равнялась единице. Допустимо использование готового пресета под типовой сценарий с последующей корректировкой.

Шаг 3. Формирование шорт-листа кандидатов. Из доступных систем отбираются 4–8 кандидатов, заведомо способных закрыть базовые требования.

Шаг 4. Оценка кандидатов по критериям. По шкале из п. 3.3 каждой системе присваивается оценка по каждому критерию.

Шаг 5. Расчёт S_j. Подстановка в формулу (1) даёт итоговый балл.

Шаг 6. Интерпретация. Победителем становится система с максимальным S_j. Если разрыв с ближайшим конкурентом меньше 0,05, выбор считается неоднозначным; рекомендуется дополнительный анализ – например, прототипирование на двух финалистах.

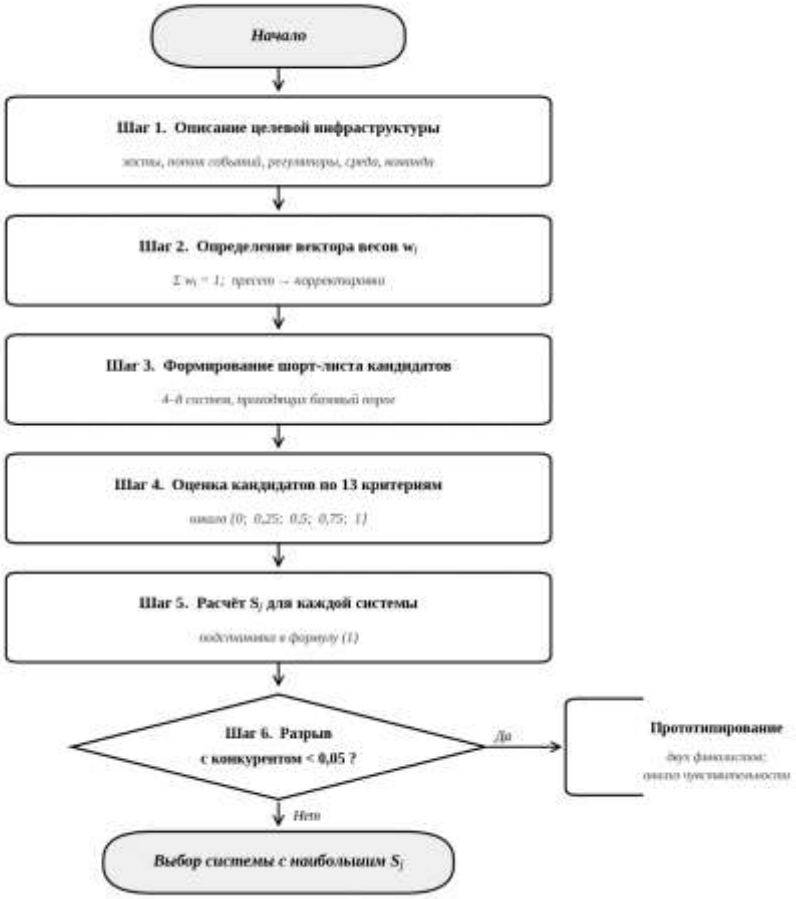


Рис. 2. Блок-схема алгоритма применения методологии

4. Применение методологии: оценка систем по критериям

Здесь приводятся результаты выполнения шага 4 алгоритма для шести отобранных систем. Оценки получены на основе официальной документации и публичных бенчмарков; ссылки на источники указываются для нетривиальных значений. Аналогичный приём – сравнение по фиксированному набору критериев – применялся в работах по сопоставлению отечественных SIEM-решений [12].

4.1. Архитектурные критерии

Оценки по группе А приведены в таблице 2.

Таблица 2. Оценки систем по архитектурным критериям

Система	A1	A2	A3	A4
Elastic Stack / OpenSearch	1,0	0,5	1,0	0,75
Grafana Loki	0,5	0,75	1,0	1,0

Система	А1	А2	А3	А4
Graylog	1,0	0,5	0,75	0,5
Splunk	1,0	0,75	1,0	0,75
Fluentd / Fluent Bit	0	1,0	0,5	0,75
Vector	0	1,0	0,5	0,75

Loki получает невысокий балл по А1 – индексация только по меткам ограничивает свободный поиск по содержимому. Vector и Fluentd по А1 оцениваются нулём, поскольку не являются хранилищами и индексации не выполняют. По А4 (Kubernetes) Loki выигрывает: проект разработан Grafana Labs специально под облачно-нативные среды [5].

4.2. Функциональные критерии

Оценки по группе Ф собраны в таблице 3.

Таблица 3. Оценки систем по функциональным критериям

Система	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4	Ф5
Elastic Stack / OpenSearch	1,0	1,0	0,75	0,75	0,75
Grafana Loki	0,75	0,75	0,75	0,5	0,5
Graylog	0,75	0,75	0,75	1,0	1,0
Splunk	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Fluentd / Fluent Bit	1,0	0,5	0,5	0,25	0,25
Vector	1,0	0,5	0,5	0,25	0,25

Корреляция событий – нетривиальная многоэтапная задача: «Процесс корреляции событий безопасности рассматривается в виде многоуровневой иерархии этапов» [14]. Splunk закономерно лидирует по Ф2 – SPL остаётся одним из самых выразительных языков на рынке – и по Ф4 (корреляция). Graylog демонстрирует сильные позиции по Ф5 за счёт зрелой ролевой модели и аудита действий администраторов [8]. Vector и Fluentd по Ф3 и Ф4 оцениваются ниже среднего: алертинг и корреляция вне их зоны ответственности.

4.3. Эксплуатационные критерии

Оценки по группе Э приведены в таблице 4.

Таблица 4. Оценки систем по эксплуатационным критериям

Система	Э1	Э2	Э3	Э4
Elastic Stack / OpenSearch	0,5	1,0	0,5	0,75

Система	Э1	Э2	Э3	Э4
Grafana Loki	1,0	1,0	1,0	0,75
Graylog	0,5	0,75	0,75	0,75
Splunk	0,5	1,0	0,25	0,75
Fluentd / Fluent Bit	1,0	0,75	1,0	0,75
Vector	1,0	0,75	1,0	0,5

Здесь видно, как лицензионная модель влияет на итог. Splunk при всех функциональных достоинствах теряет по Э3: стоимость на больших объёмах быстро становится критичной [9]. У Loki обратная сторона – дешёвое хранение даёт ему высокий балл по Э3, но порог входа для команды без опыта Grafana может оказаться выше ожидаемого. Vector чуть проседает по Э4 как самый молодой проект из шести: документация отличная, однако глубина накопленных рецептов сообщества пока меньше.

5. Апробация методологии на типовых сценариях

5.1. Описание сценариев и определение весов

Рассмотрим три сценария, покрывающие распространённые классы инфраструктуры.

Сценарий S1 – малая инфраструктура. До 50 хостов, ожидаемый поток до 10 000 EPS, команда без выделенного инженера наблюдаемости. Регуляторных требований минимум. Главные ценности – простота, низкая стоимость, быстрый старт.

Сценарий S2 – корпоративный сегмент. Свыше 500 хостов, поток 100 000+ EPS, требования ГОСТ Р 57580.1 [2] и ФСТЭК [3]. Критичны корреляция, ролевая модель и горизонтальная масштабируемость. Для российских организаций критической инфраструктуры в этом сегменте отдельно стоит вопрос «перехода на российские решения: обучение персонала и интеграция с существующей инфраструктурой» [12].

Сценарий S3 – контейнерная Kubernetes-среда. Динамический парк подов, высокая кардинальность меток, ожидаемая высокая частота развёртываний. Важны нативная интеграция с Kubernetes, поддержка структурированных форматов, низкое потребление ресурсов агентами.

Векторы весов для трёх сценариев приведены в таблице 5.

Таблица 5. Векторы весов wi для трёх сценариев

Критерий	S1 (малая)	S2 (корпорат.)	S3 (Kubernetes)
A1	0,05	0,08	0,05
A2	0,10	0,05	0,04

Критерий	S1 (малая)	S2 (корпорат.)	S3 (Kubernetes)
А3	0,05	0,07	0,06
А4	0,05	0,06	0,13
Ф1	0,08	0,07	0,13
Ф2	0,07	0,07	0,07
Ф3	0,06	0,06	0,06
Ф4	0,04	0,12	0,04
Ф5	0,04	0,12	0,05
Э1	0,07	0,05	0,13
Э2	0,04	0,12	0,08
Э3	0,20	0,08	0,08
Э4	0,15	0,05	0,08
Σ	1,00	1,00	1,00

5.2. Численный пример расчёта

Покажем расчёт S_j для системы Grafana Loki в сценарии S3. Берём оценки c_{ij} из таблиц 2–4: А1=0,5; А2=0,75; А3=1,0; А4=1,0; Ф1=0,75; Ф2=0,75; Ф3=0,75; Ф4=0,5; Ф5=0,5; Э1=1,0; Э2=1,0; Э3=1,0; Э4=0,75. Веса для S3 берутся из таблицы 5.

Подстановка в формулу (1):

$S_{Loki,\ S3} = 0{,}05 \cdot 0{,}5 + 0{,}04 \cdot 0{,}75 + 0{,}06 \cdot 1{,}0 + 0{,}13 \cdot 1{,}0 + 0{,}13 \cdot 0{,}75 +$

$+ 0{,}07 \cdot 0{,}75 + 0{,}06 \cdot 0{,}75 + 0{,}04 \cdot 0{,}5 + 0{,}05 \cdot 0{,}5 + 0{,}13 \cdot 1{,}0 + 0{,}08 \cdot 1{,}0 + 0{,}08 \cdot 1{,}0$
$+ 0{,}08 \cdot 0{,}75 = 0{,}835.$

Аналогично рассчитываются баллы для остальных систем во всех трёх сценариях. Любой шаг расчёта легко проверить независимо – это и есть свойство воспроизводимости методологии.

5.3. Итоговая таблица баллов и интерпретация

Сводные результаты для всех систем и сценариев приведены в таблице 6.

Таблица 6. Итоговые баллы Sj для шести систем в трёх сценариях

Система	S1 (малая)	S2 (корпорат.)	S3 (Kubernetes)
Elastic Stack / OpenSearch	0,730	0,808	0,785
Grafana Loki	**0,820**	0,765	**0,835**
Graylog	0,728	0,790	0,710
Splunk	0,781	**0,895**	0,813

Система	S1 (малая)	S2 (корпорат.)	S3 (Kubernetes)
Fluentd / Fluent Bit	0,740	0,583	0,715
Vector	0,703	0,570	0,695

Жирным выделены лидеры в каждом сценарии.

В сценарии S1 лидером оказывается Grafana Loki (0,820). Простой стек, низкая стоимость хранения, отсутствие тяжёлых зависимостей – всё это разворачивается в её пользу при высоких весах эксплуатационной группы. На втором месте Splunk Free (0,781) – но именно ограничения бесплатной редакции в реальной малой инсталляции часто закрывают вопрос. ELK и Graylog идут плотной группой следом.

В сценарии S2 расклад другой. Splunk выигрывает с заметным отрывом (0,895) – мощность SPL и зрелость корреляции пересиливают эксплуатационные потери от стоимости. ELK/OpenSearch показывает 0,808: компромисс между возможностями и стоимостью. На практике в крупных российских организациях именно ELK/OpenSearch чаще оказывается выбран – итоговый разрыв в 0,09 обманчив, поскольку при увеличении веса Э3 хотя бы до 0,15 лидерство переходит к ELK. Это иллюстрирует важность анализа чувствительности к весам, на что мы обращали внимание в п. 3.5.

В сценарии S3 ожидаемо побеждает Loki (0,835). Архитектура изначально проектировалась под облачно-нативную среду, ресурсоёмкость минимальна, нативная интеграция с Prometheus и Grafana образует целостный стек наблюдаемости. На втором месте – Splunk (0,813), на третьем – ELK (0,785). Любопытно, что Fluentd опередил Graylog и Vector: лёгкость DaemonSet-агента и нулевой собственный footprint в Kubernetes делают его привлекательным как часть составного решения.

По результатам исследования, ни одна из шести систем не побеждает во всех трёх сценариях. Это, по большому счёту, и подтверждает основной тезис работы – выбор СУЛ должен делаться под класс конкретной инфраструктуры.

Заключение

Предложена иерархическая методология выбора систем централизованного сбора логов, основанная на трёх измерениях критериев – архитектурном, функциональном, эксплуатационном – дискретной шкале оценивания с явными правилами и формализованной свёртке оценок с настраиваемыми весами.

Методология апробирована на шести представительных системах и трёх типовых сценариях развёртывания. Расчёты показывают, что выбор СУЛ существенно зависит от класса инфраструктуры: в малых средах побеждает Loki за счёт стоимости и простоты; в корпоративном сегменте – Splunk по совокупности функциональных возможностей, причём ELK/OpenSearch

остаётся практически предпочтительным компромиссом; в Kubernetes-средах вновь Loki – благодаря облачно-нативной архитектуре.

Практическая значимость результата состоит в том, что у архитектора появляется воспроизводимая процедура принятия решения. Тот же набор входных данных у двух разных экспертов даёт совпадающий результат – это сужает простор для произвольной аргументации и упрощает обоснование выбора перед заказчиком. Что немаловажно – методология открыта к расширению: добавление нового критерия не требует пересмотра уже сделанных оценок.

Направления дальнейших исследований видятся в трёх плоскостях. Во-первых, расширение набора критериев для специализированных SIEM-систем, где значимыми становятся параметры готовых правил детектирования и совместимость с матрицей MITRE ATT&CK. Во-вторых, интеграция методологии с количественными метриками качества обработки событий – устойчивым EPS, задержкой индексации, стоимостью хранения за гигабайт. В-третьих, разработка процедуры формального анализа чувствительности выбора к малым изменениям весов: при близких итоговых баллах двух систем-лидеров рекомендация модели должна сопровождаться оценкой её устойчивости.

Список литературы:

1. Kreps J. The Log: What every software engineer should know about real-time data's unifying abstraction // LinkedIn Engineering Blog. – 2013. – URL: https://engineering.linkedin.com/distributed-systems/log-what-every-software-engineer-should-know-about-real-time-datas-unifying (дата обращения: 15.04.2026).

2. ГОСТ Р 57580.1-2017. Безопасность финансовых (банковских) операций. Защита информации финансовых организаций. Базовый состав организационных и технических мер. – М.: Стандартинформ, 2018. – 64 с.

3. Приказ ФСТЭК России от 25 декабря 2017 г. № 239 «Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации». – М.: ФСТЭК России, 2017. – 28 с.

4. Kent K., Souppaya M. Guide to Computer Security Log Management. NIST Special Publication 800-92. – Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2006. – 72 p.

5. Grafana Labs. Grafana Loki documentation. – URL: https://grafana.com/docs/loki/latest/ (дата обращения: 18.04.2026).

6. Elastic N.V. Elastic License 2.0 (ELv2). – URL: https://www.elastic.co/licensing/elastic-license (дата обращения: 18.04.2026).

7. OpenSearch Project. OpenSearch documentation. – URL: https://opensearch.org/docs/latest/ (дата обращения: 18.04.2026).

8. Graylog Inc. Graylog documentation. – URL: https://docs.graylog.org/docs (дата обращения: 18.04.2026).

9. Splunk Inc. Splunk Enterprise documentation. – URL: https://docs.splunk.com/Documentation/Splunk (дата обращения: 18.04.2026).

10. Cloud Native Computing Foundation. Fluentd documentation. – URL: https://docs.fluentd.org/ (дата обращения: 18.04.2026).

11. Datadog Inc. Vector documentation. – URL: https://vector.dev/docs/ (дата обращения: 18.04.2026).

12. Никитенко В.О. Сравнительный анализ отечественных SIEM-систем // Электронная библиотека «КиберЛенинка». URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-otechestvennyh-siem-sistem (дата обращения: 25.04.2026).

13. Котенко И.В., Саенко И.Б., Полубелова О.В., Чечулин А.А. Применение технологии управления информацией и событиями безопасности для защиты информации в критически важных инфраструктурах // Труды СПИИРАН. – 2012. – Вып. 1(20). – С. 27–56.

14. Федорченко А.В., Левшун Д.С., Чечулин А.А., Котенко И.В. Анализ методов корреляции событий безопасности в SIEM-системах. Часть 1 // Труды СПИИРАН. – 2016. – Вып. 47. – С. 5–27. DOI: 10.15622/sp.47.1

15. Newman S. Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems. 2nd ed. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2021. – 612 p.

16. Beyer B., Jones C., Petoff J., Murphy N.R. Site Reliability Engineering: How Google Runs Production Systems. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2016. – 552 p.

УДК 004.514:004.891

Кочанов Д. С., Ризванов Д. А.
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

МОДЕЛИ, АРХИТЕКТУРА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СТЕК ДЛЯ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ НЕЧЁТКИМИ ЭКСПЕРТНЫМИ СИСТЕМАМИ

Аннотация. В статье обоснован выбор моделей, архитектуры, технологического стека и инженерных решений для Fuzzy Web - веб-приложения для создания, проверки, исполнения и сопровождения нечётких экспертных систем. Исследование исходит из конкретной проблемы: известные методы нечёткого вывода остаются трудными для практического применения, если у пользователя нет управляемой среды для хранения базы знаний, проверки правил, запуска модели, анализа результата и работы с несколькими системами. Теоретическую основу составляют теория нечётких множеств, модели вывода Мамдани и Сугено и подходы к формализации экспертных знаний. Методологически работа опирается на анализ источников, сравнение программных средств, доменное моделирование, архитектурное проектирование и оценку качества по явным критериям. В результате выделены три проблемных узла работы с нечёткими экспертными системами: представление базы знаний, проверка модели до запуска и объяснение результата вывода. Для Fuzzy Web обоснованы доменная модель, API-ориентированная архитектура с изолированным модулем нечёткого вывода, выбор технологического стека, а также роль семантической валидации, трассировки, снимков состояния, импорта/экспорта, API-токенов и аудита.

Ключевые слова: нечёткая логика; нечёткая экспертная система; база знаний; веб-приложение; самостоятельное развёртывание; Мамдани; Сугено; семантическая валидация; трассировка вывода

Нечёткая логика полезна в задачах, где решение нельзя свести к жёстким порогам и бинарным условиям. Во многих предметных областях используются оценки вроде «низкий риск», «высокая нагрузка» или «комфортная температура». Такие оценки можно формализовать через степень принадлежности значения к нечёткому множеству (класс объектов с градуальной принадлежностью, степень принадлежности к которым задаётся числом от 0 до 1). Эту идею предложил Л. Заде [1], а затем она получила развитый математический и прикладной аппарат, подробно представленный и в современной русскоязычной литературе [2; 3].

Нечёткая экспертная система рассматривается как система поддержки решений на основе правил, в которой знания предметной области описываются через базу знаний и механизм вывода. Механизм вывода в таком контексте означает процедуру, которая применяет правила к входным значениям и получает выходной результат. База знаний включает переменные, термы, функции принадлежности и правила вида ЕСЛИ/ТОГДА; терм при этом

означает лингвистическую метку переменной, например, «низкий», «средний» или «высокий». За счёт такой структуры модель остаётся читаемой для эксперта, а её поведение можно обсуждать и проверять. Значимость формализации нечётких экспертных знаний и правил подчёркивается в работах по экспертным системам и программным средствам их реализации [4; 5; 6].

В прикладной традиции методы Мамдани и Сугено выступают базовыми схемами нечёткого вывода [7; 8]. В методе Мамдани правила задают нечёткие заключения, которые затем агрегируются и дефаззифицируются, то есть переводятся в точное числовое значение; в методе Сугено заключение правила сразу имеет числовую форму, поэтому итог считается как взвешенное объединение результатов правил. Однако сам алгоритм не решает практическую задачу без среды, где можно хранить базу знаний, анализировать правила и сопровождать модель на всём жизненном цикле. Поэтому речь идёт не об отдельной функции расчёта, а об информационной системе вокруг алгоритма.

Существующие программные средства реализации нечётких экспертных систем чаще ориентированы либо на отдельные инженерные задачи, либо на специализированные среды моделирования, а не на многопользовательскую web-среду с хранением моделей, разграничением прав, аудитом и машинным доступом [5; 9]. Отсюда и возникает задача Fuzzy Web – нового веб-ориентированного решения: объединить известные методы нечёткого вывода с веб-ориентированной и самостоятельно развёртываемой системой, пригодной для учебных, исследовательских и прикладных инженерных сценариев.

В исследовании эта задача сведена к трём практическим проблемам: как формально представить базу знаний, как проверить её до запуска и как сделать результат вывода объяснимым для пользователя. Цель работы состоит в обосновании моделей, архитектуры и технологического стека такого приложения. Для её достижения рассматриваются доменная модель, схема хранения, границы клиентской и серверной частей, выбор технологий, механизмы семантической валидации, трассировки, импорта и экспорта, API-доступа и аудита. Ожидаемый результат: обоснованное архитектурно-информационное решение, которое можно использовать как основу для будущего веб-приложения.

Теоретическая основа исследования включает теорию нечётких множеств Л. Заде [1], базовые модели нечёткого вывода Мамдани и Сугено [7; 8], а также работы по формализации нечётких экспертных знаний и анализу программных средств [4; 5; 6; 10]. Методология следует из самого предмета исследования: сначала нужно понять, какие знания хранит нечёткая экспертная система, затем описать их в доменной модели, после этого провести архитектурное разделение клиентской части, API, хранилища и модуля вывода, а уже затем оценивать качество по проверяемым критериям [11; 12].

Выбор веб-приложения для нечётких экспертных систем связан со структурой самой задачи. Пользователь работает не с одним алгоритмом, а с набором связанных сущностей: переменными, термами, функциями принадлежности, правилами, настройками вывода, результатами валидации и запусками. Если эти данные разнесены по файлам или скрыты в коде, быстро возникают проблемы сопровождения и воспроизводимости. Веб-среда позволяет собрать их в одном управляемом контуре.

Веб-ориентированный подход делает браузер и HTTP API основным способом работы. HTTP API в этой работе означает программный интерфейс поверх HTTP, через который клиентская часть и внешний сервис обращаются к операциям приложения. Пользователь может редактировать систему, проверять её и выполнять вывод без отдельной настольной среды, а внешний сервис - вызывать активную систему программно. Для веб-ориентированных систем это означает переход от изолированного расчёта к управляемому сервису, который можно оценивать по качеству взаимодействия, интеграции и доступности [11].

Подход с самостоятельным развёртыванием дополняет эту схему. Он позволяет запускать систему в учебной лаборатории, внутри организации или на собственной инфраструктуре и сохранять контроль над базой знаний, доступом и журналированием. При этом система поддерживает хранение моделей, аудит, снимки состояния, импорт/экспорт и API-токены, но не заявляет совместное редактирование в реальном времени или промышленную отказоустойчивость.

Базовой редактируемой единицей в предлагаемом веб-приложении является отдельная экспертная система. Она хранит метаданные, метод вывода, настройки выполнения, статус жизненного цикла, ревизию, состояние валидации, входные и выходные переменные, термы, функции принадлежности и правила. Такое представление позволяет работать не с одной моделью, а с каталогом независимых систем.

Внутри базы знаний выделяются четыре основные группы сущностей: переменные, термы, функции принадлежности и правила. Переменные задают диапазоны и область допустимых числовых значений. Термы представляют лингвистические метки. Функции принадлежности определяют, как вычисляется степень принадлежности. Правила связывают условия по входным переменным с последствиями для выходных.

Различие между методами вывода отражается прямо в модели. Для метода Мамдани последствие указывает выходную переменную и выходной терм. Для метода Сугено последствие задаёт постоянное или линейное выражение. Кроме того, система проходит через состояния черновик, проверенная, активная и архивированная, а изменения контролируются ревизией и механизмом отката. Это отделяет редактируемую версию от версии, пригодной для выполнения.

Таблица 1 показывает, как элементы модели связаны с пользовательскими сценариями.

Таблица 1 – Связь доменной модели с пользовательскими сценариями

Часть модели	**Её роль**
Нечёткая система со статусом и ревизией	Каталог, редактирование, валидацию, активацию, архивирование и конфликт версий
Переменные и диапазоны	Формы входов, проверку допустимых значений, настройку областей функций принадлежности
Термы и функции принадлежности	Лингвистическое описание модели, графики, фаззификацию и диагностики
Правила с условиями и последствиями	Конструктор базы знаний, вывод Мамдани/Сугено, анализ активных правил
Сводка валидации	Быстрое отображение результата проверки и запрет активации некорректной системы
Запуск и трассировка вывода	Историю запусков, анализ результата и воспроизводимость входов/выходов
Снимок состояния	Активацию, ручную фиксацию состояния, откат и защиту перед перезаписью при импорте
API-токен	Внешнее выполнение активной системы
Событие аудита	Контроль значимых действий, отказов доступа и операций с системой

Такая модель превращает нечёткую экспертную систему из набора правил в управляемый объект веб-приложения. Она фиксирует данные, без которых трудно обеспечить проверку, переносимость и объяснимость результата.

Архитектура Fuzzy Web делит систему на четыре части: клиентскую, серверный API, постоянное хранилище и доменный модуль нечёткого вывода. Такое разделение удобнее для задачи, чем настольное приложение или библиотека без интерфейса. Настольная среда хуже подходит для централизованного хранения и аудита, а библиотека не закрывает рабочий процесс пользователя.

Клиентская часть реализована как одностраничное приложение и отвечает за каталог систем, редактор, визуализацию функций принадлежности и трассировки вывода. Серверный API остаётся центральной границей приложения: через него проходят изменение структуры системы, валидация, активация, выполнение вывода, импорт/экспорт, создание API-токенов и аудит. Это важно ещё и потому, что Fuzzy Web обслуживает как пользователя в браузере, так и внешний сервис.

База данных хранит постоянное состояние системы: пользователей, роли, права, экспертные системы и связанные с ними данные. Модуль нечёткого вывода отделён от HTTP, механизма объектно-реляционного отображения (ORM) и схем клиентской части. Он получает готовое определение системы,

выполняет семантическую проверку или вывод и возвращает результаты с диагностикой и трассировкой. Такое разделение упрощает тестирование и не даёт предметной логике раствориться в обработчиках запросов.

Такая архитектура соответствует веб-ориентированному и самостоятельно развёртываемому приложению. Браузер работает через единый API, внешний клиент получает ограниченный сценарий выполнения, сервер контролирует права и жизненный цикл, а модуль вывода остаётся независимым от инфраструктуры.

Выбор стека определялся в первую очередь задачей проекта: нужен был типизированный серверный API, интерактивный браузерный редактор, надёжное хранилище и простой контур самостоятельного развёртывания.

Серверная часть реализована на языке программирования Python 3.12 с использованием серверного фреймворка FastAPI. Такой набор хорошо подходит для приложения, где сочетаются веб-API, доменная логика и работа со структурированными схемами данных. Для доступа к данным используются библиотеки SQLAlchemy и Alembic. Это даёт явную работу с моделями, транзакциями и миграциями.

В качестве постоянного хранилища выбран PostgreSQL, поскольку в системе много связанных сущностей и вложенных данных. Клиентская часть построена на языке программирования TypeScript, с использованием фреймворка Vue 3, а для сборки и маршрутизации используются инструмент и библиотека: Vite и Vue Router. За состояние отвечает библиотека Pinia, за HTTP-вызовы - Axios, за графики - ECharts. Для самостоятельного развёртывания выбран инструмент Docker Compose.

Таблица 2 обобщает связь между задачами приложения и выбранными технологиями.

Таблица 2 – Технологический стек Fuzzy Web

Слой	**Технологии**	**Причина выбора**
Серверный API	Python 3.12, FastAPI, Pydantic	Типизированный API, удобная работа со схемами
Хранилище и доступ к данным	PostgreSQL 16, SQLAlchemy 2.x, Alembic	Реляционные связи, транзакции, миграции, JSONB для вложенных данных
Аутентификация и базовая защита	JWT, Bearer-токены, Argon2-compatible password hashing	Простая модель доступа, ограниченные API-токены
Клиентская часть	Vue 3, TypeScript, Vite, Vue Router, Pinia, Axios	Компонентный веб-интерфейс
Визуализация	ECharts / vue-echarts	Графики функций принадлежности, агрегации и результатов вывода

Слой	Технологии	Причина выбора
Развёртывание	Dockerfile, Docker Compose, .env, health endpoints	Одновременное развёртывание сразу всех сервисов

Такой стек не является единственно возможным, но хорошо соответствует масштабу проекта: FastAPI ускоряет разработку API, Vue подходит для редакторского интерфейса, PostgreSQL обеспечивает устойчивое хранение, а Docker Compose упрощает запуск системы.

В Fuzzy Web центральное место занимают семантическая валидация и трассировка вывода. Без них приложение было бы редактором структур с кнопкой запуска. С ними оно становится средой, в которой модель можно проверить и объяснить.

Семантическая валидация нужна потому, что корректный JSON ещё не гарантирует корректную нечёткую экспертную систему. Пользователь может создать переменную без термов, задать неверные параметры функции принадлежности, сослаться на несуществующий терм или оставить систему без выходной переменной. Поэтому база знаний проверяется до активации. Результат проверки возвращается в виде упорядоченного списка диагностик с кодом, уровнем серьёзности, путём и сообщением.

Трассировка вывода отвечает на вопрос, почему получен именно такой результат. Для метода Мамдани она включает степени принадлежности, трассировку правил, агрегацию и данные дефаззификации. Для метода Сугено - степени принадлежности, силу срабатывания правил, промежуточные значения и итоговый числовой результат. Это важно и для обучения, и для инженерной отладки базы знаний.

Помимо вывода, приложение должно поддерживать жизненный цикл экспертной системы. В Fuzzy Web эту роль выполняют снимки состояния, откат, версионированный импорт/экспорт JSON-пакетов, API-токены и журнал аудита.

Снимок состояния хранит метаданные системы, настройки вывода, переменные, термы, функции принадлежности и правила на выбранный момент времени. Он создаётся при активации, вручную, перед откатом и перед перезаписью при импорте. Импорт/экспорт решают задачу переносимости: в пакет входят структура системы и база знаний, но не включаются пароли, секреты, история запусков и другие данные конкретного экземпляра приложения.

API-токен даёт внешний машинный доступ только к одной системе и только для выполнения вывода. Секрет показывается один раз, а затем хранится в виде хэша. Журнал аудита фиксирует значимые действия: входы, отказы доступа, управление пользователями, операции жизненного цикла, импорт/экспорт, действия с токенами и сохранённые запуски. Для

многопользовательской системы это часть управляемости, а не дополнительная функция.

Качество Fuzzy Web корректно оценивать по явным критериям, сочетая стандартную модель качества ПО и подходы к экспертной оценке веб-ориентированных систем, а не по общему впечатлению от интерфейса [11; 12]. Для разработанного приложения наиболее важны функциональная пригодность, корректность, удобство использования, безопасность и развёртываемость.

По функциональной пригодности система закрывает основной цикл работы с нечёткой экспертной системой: создание, редактирование, семантическую валидацию, активацию, выполнение вывода, сохранение истории, импорт/экспорт, снимки состояния, API-токены и аудит. По корректности важным решением остаётся отделение модуля вывода от HTTP, ORM и клиентской части. Однако предметная правильность конкретной модели всё равно зависит от качества базы знаний.

Проведённый анализ показывает, что для такого класса задач оправдан веб-ориентированный и самостоятельно развёртываемый подход. Он снижает порог входа, делает систему пригодной для интеграции через API и позволяет сохранить контроль над данными. Ключевыми решениями в этой модели становятся доменная структура экспертной системы, семантическая валидация базы знаний и трассировка вывода.

Список литературы:

1. Zadeh L. A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8, no. 3. P. 338-353. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001999586590241X (дата обращения: 22.05.2026).
2. Басков О. В., Ногин В. Д. Нечеткие множества второго порядка и их применение в принятии решений. Общие понятия // Искусственный интеллект и принятие решений. 2021. № 1. С. 3-14. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=45149116 (дата обращения: 15.05.2026).
3. Катасёв А. С. Модели и методы формирования нечетких правил в интеллектуальных системах диагностики состояния сложных объектов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.18. Казань, 2014. 35 с. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01005555428 (дата обращения: 15.05.2026).
4. Борисова Л. В., Димитров В. П. Формализация нечетких экспертных знаний при лингвистическом описании технических систем: монография. Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2011. 208 с. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01005021193 (дата обращения: 15.05.2026).
5. Глушенко Сергей Андреевич Анализ программных средств реализации нечетких экспертных систем // Программные системы и вычислительные методы. 2017. №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-programmnyh-sredstv-realizatsii-nechetkih-ekspertnyh-sistem (дата обращения: 22.05.2026).
6. Малышев Н. Г., Берштейн Л. С., Боженюк А. В. Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 135 с. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01001590203 (дата обращения: 15.05.2026).
7. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // International Journal of Man-Machine Studies. 1975. Vol. 7, no. 1. P. 1-13. URL:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020737375800022 (дата обращения: 22.05.2026).

8. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1985. Vol. SMC-15, no. 1. P. 116-132. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781483214504500456 (дата обращения: 22.05.2026).

9. Кочанов Д.С., Ризванов Д.А. Программное обеспечение для разработки нечёткой экспертной системы // Научные исследования 2024: актуальные теории и концепции: сборник материалов XLIX-ой международной очно-заочной научно-практической конференции : в 3 т. Москва, 2024. С. 13-15. EDN: CCNHFR. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69204217 (дата обращения: 16.05.2026).

10. Klir G. J., Yuan B. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 1995. 574 p. ISBN 9780131011717. URL: https://openlibrary.org/isbn/9780131011717 (дата обращения: 21.05.2026).

11. Долженко Алексей Иванович, Шполянская Ирина Юрьевна Нечеткие модель и алгоритм оценки качества веб-сервисов, интегрируемых в сервис-ориентированную архитектуру информационной системы // Программные системы и вычислительные методы. 2017. №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/nechetkie-model-i-algoritm-otsenki-kachestva-veb-servisov-integriruemyh-v-servis-orientirovannuyu-arhitekturu-informatsionnoy-sistemy (дата обращения: 22.05.2026).

12. ISO/IEC 25010:2023. Systems and software engineering - Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - Product quality model. URL: https://www.iso.org/standard/78176.html (дата обращения: 21.05.2026).

УДК 004.413:004.8

Шатохин В. Н.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СТЕКА ДЛЯ КЛИЕНТ-СЕРВЕРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Аннотация: в статье рассматривается реализация интеллектуальной системы подбора технологического стека и архитектуры для клиент-серверных приложений. Описаны архитектурные решения на основе микросервисного подхода, применённые технологии (React, Weaviate, Neo4j), математическая модель гибридного ранжирования рекомендаций, а также особенности реализации клиентской и серверной частей системы. Приведены результаты функционального тестирования.

Ключевые слова: клиент-серверные приложения, рекомендательная система, искусственный интеллект, микросервисная архитектура.

Введение

Выбор технологического стека и архитектуры при создании клиент-серверных приложений по-прежнему остаётся слабо формализованным процессом. Как правило, это решение принимается на основе субъективных предпочтений команды, а не объективных критериев проекта [2, 3]. В работе [1] проведён сравнительный анализ архитектурных подходов и методологий разработки, обоснован выбор микросервисной архитектуры для интеллектуальных рекомендательных систем и предложена концепция системы автоматизированного подбора стека технологий.

Цель настоящей работы — описать практическую реализацию системы, концепция которой обоснована в [1]. Для достижения цели решаются следующие задачи: проектирование микросервисной архитектуры системы; реализация сервисов обработки естественного языка, векторного поиска и графа знаний; разработка гибридной модели ранжирования рекомендаций; создание клиентского интерфейса; тестирование и оценка качества рекомендаций. В качестве методов исследования применялись проектирование программных систем, методы машинного обучения (коллаборативная и контентная фильтрация) и экспертная оценка.

1. Общая архитектура системы

В соответствии с обоснованием, представленным в [1], система построена на микросервисной архитектуре с чётким разделением ответственности между компонентами. Выделяются три уровня: уровень представления (веб-интерфейс на React), уровень интеграции (API-шлюз

Kong) и уровень бизнес-логики (специализированные микросервисы). Такое разделение обеспечивает независимое масштабирование каждого компонента и упрощает внесение изменений.

Серверная часть включает четыре микросервиса: NLP-сервис, сервис векторного поиска, сервис графа знаний и гибридный рекомендательный сервис. Все компоненты упакованы в Docker-контейнеры и управляются через Docker Compose, что обеспечивает воспроизводимость окружения и упрощает развёртывание [4]. Для хранения данных используются три специализированные СУБД: Weaviate (векторная), Neo4j (графовая) и PostgreSQL (реляционная). Общая структура системы показана на рисунке (Рис. 1).

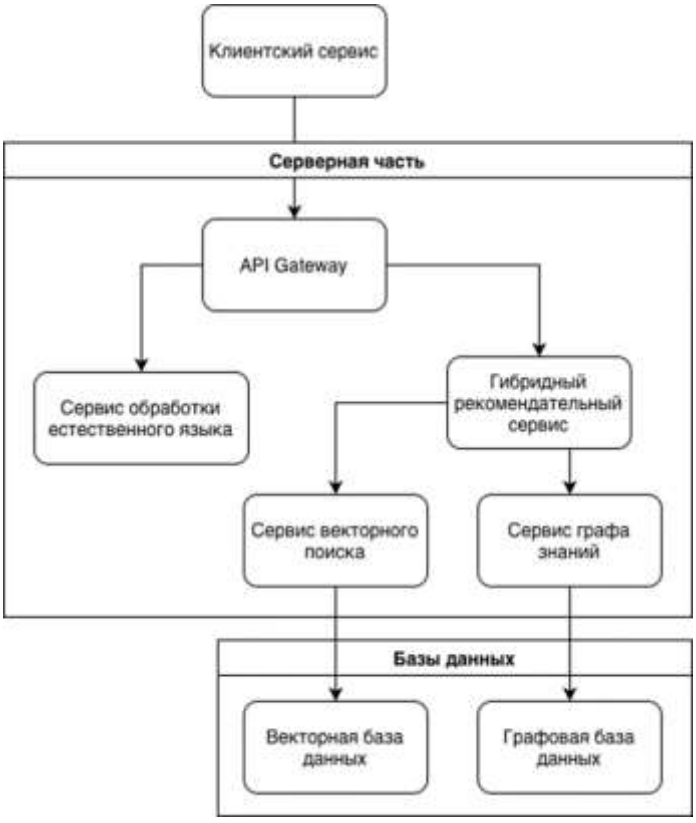


Рисунок 1. Компонентная архитектура интеллектуальной системы

При недоступности одного из сервисов реализован механизм деградации: система продолжает работу на основе оставшихся компонентов, информируя пользователя о частичной доступности функционала.

2. Математическая модель рекомендации

Основу алгоритма составляет задача многокритериальной оптимизации. Каждый проект описывается вектором признаков $p = (p_1, p_2, ..., p_n) \in \mathbb{R}^n$, где компоненты отражают тип приложения, планируемую нагрузку, бюджет, сроки и требования к масштабируемости. Каждый технологический стек

задаётся вектором характеристик $s = (s_1, s_2, ..., s_n) \in \mathbb{R}^n$. Целевая функция совместимости F(p, s), которую необходимо максимизировать, включает взвешенную сумму косинусного сходства векторов, показатель надёжности стека в профессиональном сообществе, оценку внутренней совместимости технологий и весовые приоритеты проекта [5].

В системе реализованы три метода формирования рекомендаций, объединяемых через взвешивание. Коллаборативная фильтрация: если пользователи A и B выбирали схожие стеки для аналогичных проектов, их будущий выбор с высокой вероятностью также совпадёт; для поиска k ближайших соседей применяется косинусное сходство и корреляция Пирсона. Контентно-ориентированная фильтрация: стеки ранжируются по степени близости их атрибутов к параметрам проекта с использованием коэффициента Жаккара и евклидова расстояния. Каскадирование: первый метод формирует расширенный список кандидатов, который затем переранжируется вторым методом [6].

Итоговая оценка вычисляется как взвешенная сумма: $Score(p, s) = \alpha \cdot CF(p, s) + (1 - \alpha) \cdot CB(p, s)$, где CF — оценка коллаборативной фильтрации, CB — оценка контентной фильтрации, $\alpha \in [0, 1]$ подбирается адаптивно в зависимости от объёма накопленных исторических данных.

3. Реализация серверной части

NLP-сервис реализован на Python с применением Hugging Face Transformers и spaCy. На вход принимается свободный текстовый запрос пользователя; сервис выполняет токенизацию, извлечение именованных сущностей (тип приложения, бюджет, сроки, требования к масштабируемости) и классификацию намерения. Результат — структурированный вектор признаков проекта, передаваемый в остальные компоненты конвейера [7].

Сервис векторного поиска реализован на FastAPI с клиентской библиотекой Weaviate. Описания стеков технологий заранее преобразуются в векторные представления и индексируются в Weaviate. При поступлении запроса вектор проекта сравнивается с векторами стеков по косинусному сходству, и система отбирает топ-N наиболее близких вариантов. Weaviate выбран за встроенную поддержку гибридного поиска, сочетающего семантическое и ключевое сопоставление.

Сервис графа знаний построен на Java Spring Boot с Cypher Query Language для Neo4j. Граф содержит узлы — архитектурные паттерны, методологии, технологии и их атрибуты; рёбра кодируют отношения совместимости, предпочтительного применения и ограничений. Запросы к графу позволяют явно проследить цепочку рассуждений при формировании рекомендации, что обеспечивает интерпретируемость результатов [8]. Порядок взаимодействия сервисов при обработке запроса отражён на рисунке (Рис. 2).

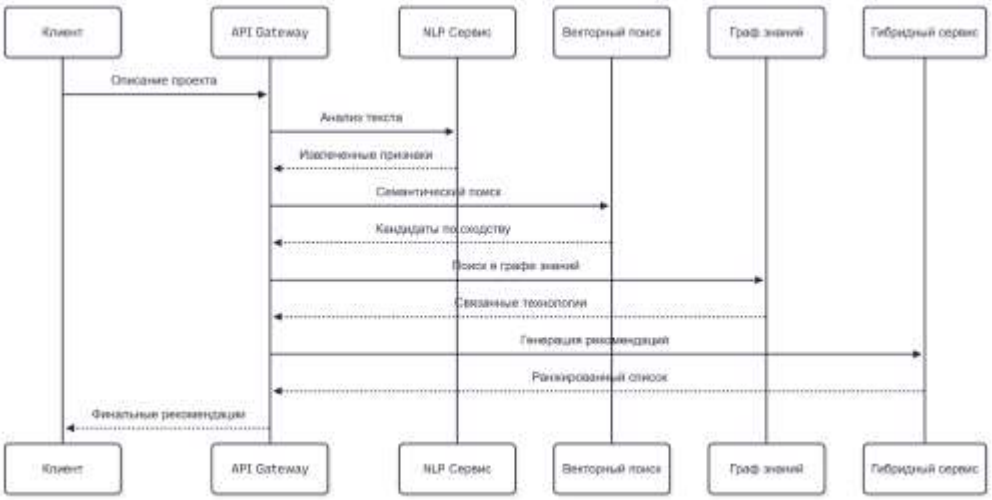


Рисунок 2. Sequence-диаграмма взаимодействия микросервисов

Оркестрацию сервисов выполняет Kong API Gateway. При поступлении запроса шлюз параллельно направляет NLP-сервису исходный текст, а сервисам векторного поиска и графа знаний — полученный вектор признаков. Результаты агрегируются в гибридном рекомендательном сервисе (LightFM), который формирует итоговый ранжированный список и возвращает его клиенту.

4. Реализация клиентской части

Клиентское приложение разработано на React с использованием React Bootstrap для построения адаптивного интерфейса и Sass (SCSS) для стилизации компонентов. Сборка выполняется инструментом Vite, что обеспечивает быстрый старт и горячую перезагрузку модулей в режиме разработки.

Архитектура фронтенда реализует паттерн разделения контейнеров и презентационных компонентов. App.jsx — корневой оркестратор, управляющий жизненным циклом и передачей состояния. ProjectInput.jsx — форма ввода описания проекта с валидацией и debounce-защитой. ProcessingPipeline.jsx — интерактивная визуализация конвейера обработки, наглядно показывающая, какой именно сервис обрабатывает запрос в данный момент. RecommendationResults.jsx — компонент отображения результатов в виде структурированных карточек с обоснованием для каждой категории стека (frontend, backend, базы данных, инфраструктура) [9]. Взаимодействие компонентов клиентской части показано на рисунке (Рис. 3).

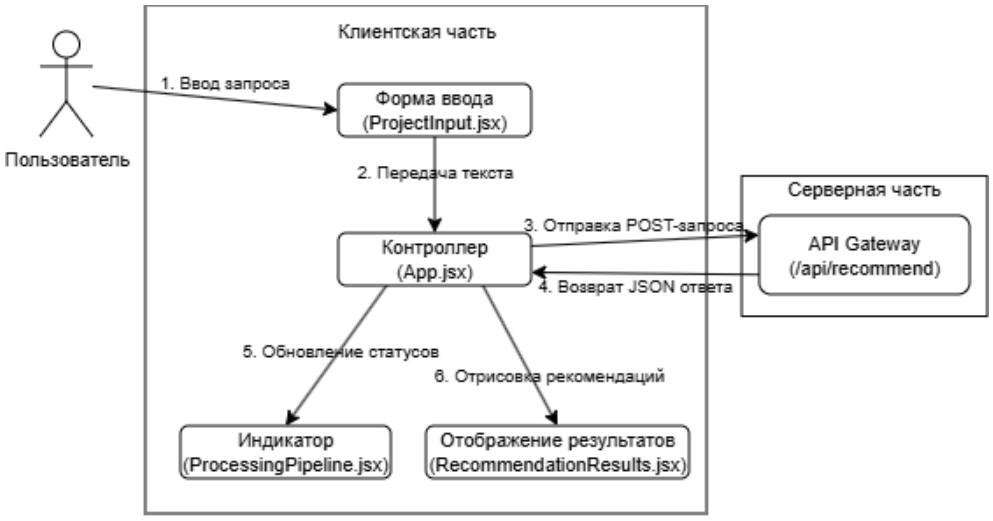


Рисунок 3. Диаграмма взаимодействия компонентов клиентской части

Одним из главных архитектурных решений при разработке стал принцип, который можно назвать «нулевой конфигурацией»: перед пользователем находится единственное поле ввода, куда он описывает свой проект в произвольной форме, без каких-либо дополнительных настроек. Взаимодействие с сервером выстроено на нативном Fetch API с использованием конструкций async/await и обработкой исключений через Try/Catch. Если один из сервисов оказывается недоступен, система автоматически переключается в режим ограниченной работы и оповещает пользователя о том, что часть функций временно недоступна [10].

5. Тестирование и результаты

Проверка системы проходила последовательно в три стадии: сначала тестировались отдельные модули, затем их взаимодействие между собой, и наконец проводилось пользовательское тестирование. Нагрузочные испытания выполнялись с помощью JMeter и Apache Bench; за состоянием системы наблюдали через Prometheus и Grafana, ошибки фиксировались в Sentry, а логи обрабатывались средствами стека Elasticsearch/Logstash.

В штатном режиме работы среднее время отклика системы находилось в диапазоне 1,2–1,8 секунды. При пиковых нагрузках, когда число одновременных запросов превышало 50, этот показатель возрастал до 3–4 секунд — что по-прежнему укладывается в допустимые нормы для подобного класса систем. В пользовательском тестировании приняли участие 12 человек — студенты и начинающие специалисты. Средняя оценка качества рекомендаций составила 4,1 из 5 баллов, а 9 из 12 участников указали, что предложенные системой варианты совпали с теми, которые они выбрали бы самостоятельно.

Сравнение трёх подходов к фильтрации показало устойчивое преимущество гибридной модели: среди топ-3 рекомендаций точность

гибридного метода составила 78%, тогда как коллаборативная фильтрация показала 63%, а контентная — 71%. Полученные данные подтверждают, что предложенный подход не только теоретически обоснован, но и работает на практике.

Вывод

В работе описана реализация интеллектуальной системы подбора технологического стека и архитектуры для клиент-серверных приложений. Система построена на микросервисной архитектуре и включает NLP-сервис (Hugging Face Transformers, spaCy), сервис векторного поиска (Weaviate, FastAPI), сервис графа знаний (Neo4j, Java Spring Boot) и гибридный рекомендательный сервис (LightFM). Клиентская часть реализована на React с Vite и SCSS. Гибридная модель ранжирования, сочетающая коллаборативную и контентную фильтрацию, обеспечила точность top-3 рекомендаций на уровне 78 %, а среднее пользовательское качество — 4,1 балла из 5.

Система закрывает практический разрыв, обозначенный в [1]: переход от теоретического сравнения архитектур к автоматизированному инструменту, доступному командам любого размера. Дальнейшее развитие предполагает расширение базы знаний за счёт автоматического парсинга технических ресурсов, введение механизма обратной связи и переход к диалоговому режиму взаимодействия.

Список литературы:

1. Шатохин В.Н. (в печати) Оптимизация выбора архитектуры и методологии разработки клиент-серверных приложений с применением искусственного интеллекта / В.Н. Шатохин. — Информационное моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы IX Международной научно-практической конференции; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. — Санкт-Петербург: СПОГАСУ, 2026.

2.Прунов А. Архитектура «клиент-сервер»: основы и принципы [Электронный ресурс] // Айтиспектр. — URL: https://itspectr.ru/arhitektura-klient-server-osnovy-i-princzipy/ (дата обращения: 18.12.2024).

3.Рассказов В.В. Проблемы масштабируемости информационных систем / В.В. Рассказов. — Аналитические исследования, 2024. — № 1. — С. 102–114.

4.Чернов С.В. Контейнеризация в разработке ПО / С.В. Чернов. — Информационные технологии, 2023. — № 7. — С. 56–67.

5.Гусев А.А. Подход к поиску эффективного набора взаимодействующих компонентов на основе роевого интеллекта / А.А. Гусев. — Программная инженерия, 2023. — № 4. — С. 88–97.

6.Yang Y., Yang B., Wang S., Jin T., Li S. Применение многоцелевого оптимизатора «Серый волк» для компоновки сервисов / Yang Y. и др. — IEEE Transactions on Big Data, 2021.

7.Gholamshahi S., Hasheminejad S.M.H. Обзор методов идентификации и выбора программных компонентов / Gholamshahi S., Hasheminejad S.M.H. — Journal of Software, 2021.

8.Баранов А.И. Микросервисы и их роль в масштабируемости / А.И. Баранов. — Вестник технологий, 2023. — № 8. — С. 23–35.

9.Васильев П.О. Кейс внедрения микросервисной архитектуры / П.О. Васильев. — М.: Решения, 2023. — № 12. — С. 50–65.

10.Соколов И.В. Интеграция DevOps-методов в разработке ПО / И.В. Соколов. — Технологии сегодня, 2023. — № 2. — С. 112–125.

УДК 004.422.63:004.332

Козырев Н. А.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЛОКАЛЬНОСТИ ДАННЫХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КЭШ-ПАМЯТИ ПРОЦЕССОРА ПРИ ОБРАБОТКЕ КОЛЛЕКЦИЙ В SWIFT НА АРХИТЕКТУРЕ APPLE SILICON

Аннотация. Объектом исследования являются массивы значимых (struct) и ссылочных (class) типов языка Swift при итерации на процессоре Apple M3 Pro. Использован метод сочетания микробенчмарков с измерением аппаратных счетчиков L1D_CACHE_MISS_LD и INST_ALL через Xcode Instruments. Установлено, что преимущество значимых типов достигает 2,38× в сценарии чистой итерации при N=100 000, 2,64× в реалистичной цепочке filter+map+sort при N=1 000 000, а стоимость случайного срабатывания Copy-On-Write превышает inout-мутацию в 1728 раз. Аппаратные счетчики зафиксировали превышение промахов L1D на 35 % и общего числа исполненных инструкций на 14 % для ссылочных типов.

Ключевые слова: пространственная локальность данных, кэш-память процессора, Apple Silicon, Swift, значимые типы, ссылочные типы, автоматический подсчет ссылок, аппаратные счетчики производительности.

1. Введение

Мобильные приложения экосистемы Apple, разрабатываемые на языке Swift, обрабатывают коллекции объектов размером от десятков тысяч до миллионов элементов: списки контактов, ленты сообщений, кэши изображений, журналы телеметрии. На уровне исходного кода разработчик оперирует абстрактными типами struct и class, выбирая между ними по семантическим соображениям. Однако выбор типа задает физическое размещение данных в памяти и определяет эффективность работы процессора с многоуровневой иерархией кэш-памяти.

Процессоры семейства Apple Silicon микроархитектурно отличаются от x86-64. Строка кэша M-series – 128 байт против 64 байт на x86-64 [6, 8]. L1D-кэш производительного ядра содержит 128 КБ – это вдвое больше типового значения для конкурирующих ARM-ядер. Кэш системного уровня (SLC) реализован как эксклюзивный относительно CPU-кэшей, что меняет динамику вытеснения строк [7]. Поверх нестандартной аппаратной конфигурации язык Swift добавляет собственные источники накладных расходов – автоматический подсчет ссылок (ARC) с атомарными операциями retain/release и семантику Copy-On-Write для коллекций.

Совокупное влияние этих факторов на эффективность кэш-памяти изучено фрагментарно. Работа [1] исследует противопоставление Data-Oriented и Object-Oriented Design на C++/x86, демонстрируя превосходство первого подхода за счет пространственной локальности. Авторы работы [3] количественно оценивают ARC-overhead в программах на Swift, фиксируя долю до 80 % времени выполнения. Однако совместное измерение влияния layout-памяти и ARC на коэффициент промахов L1-кэша с использованием аппаратных счетчиков на платформе ARM с 128-байтной строкой кэша в академической литературе отсутствует.

Целью работы является количественная оценка влияния пространственной локальности данных на эффективность кэш-памяти процессора Apple M3 Pro при итерации коллекций значимых и ссылочных типов Swift. Для достижения цели поставлены следующие задачи: разработать набор сценариев бенчмаркинга, изолирующих эффекты layout, ARC и Copy-On-Write; провести измерения времени выполнения и аппаратных счетчиков L1D_CACHE_MISS_LD и INST_ALL посредством Xcode Instruments; установить функциональную зависимость отношения производительности от размера коллекции N; объяснить наблюдаемые закономерности через микроархитектурные свойства Apple Silicon.

2. Теоретическое обоснование

2.1. Иерархия памяти и пространственная локальность. Эффективность вычислительной системы определяется не только пиковой производительностью АЛУ, но и средним временем доступа к памяти. В многоуровневой модели подсистемы памяти каждый последующий уровень характеризуется большим объемом и существенно большей латентностью [15]. Среднее время доступа описывает формула:

$$T_{avg} = p_1 \cdot t_1 + (1 - p_1) \cdot p_2 \cdot t_2 + (1 - p_1)(1 - p_2) \cdot t_{RAM}, (1)$$

где p_i – вероятность попадания на уровень i, t_i – соответствующая латентность.

Цель оптимизации – максимизация p_1 и p_2. Процессор подгружает данные не побайтно, а блоками фиксированного размера – строками кэша. Процессор оперирует не отдельными байтами, а строками кэша фиксированного размера. На Apple M3 Pro этот размер составляет 128 байт [6, 8]. Принцип пространственной локальности утверждает, что при обращении по адресу A программа с высокой вероятностью обратится по адресу A+δ в ближайшем будущем [16]. Аппаратный prefetcher эксплуатирует это свойство, заранее подгружая последующие строки кэша при обнаружении регулярного шага доступа.

2.2. Layout значимых и ссылочных типов в Swift. Значимые типы (struct, enum) размещаются по месту объявления: в локальной области функции – на стеке, в массиве – последовательно в выделенном буфере [10]. Массив N

экземпляров типа PrimitiveStruct размером 32 байта занимает 32N байт непрерывного блока, что обеспечивает 4 элемента на одну строку кэша Apple Silicon. Ссылочные типы (class) размещаются в куче, а массив хранит 8-байтные указатели на heap-объекты [5, 10]. При итерации массива N экземпляров класса процессор выполняет два независимых обращения – к буферу указателей и к heap-объекту по непредсказуемому адресу.

2.3. Pointer chasing и автоматический подсчет ссылок. Описанный паттерн доступа известен как pointer chasing. Авторы работы [2] демонстрируют, что он сериализует обращения к памяти, провоцирует одновременно промахи L1 и буфера трансляции адресов TLB, блокирует out-of-order-исполнение, поскольку каждое следующее обращение зависит от результата предыдущего. Дополнительные накладные расходы в Swift создает ARC. При каждом обращении к ссылочному типу выполняются атомарные операции retain и release – они обновляют счетчик ссылок в заголовке объекта [3, 10]. Атомарность реализуется через инструкции Compare-And-Swap, действующие как memory barrier: они принудительно сериализуют операции с памятью и инвалидируют строку кэша во всех остальных ядрах. Авторы работы [3] установили, что в объектно-ориентированном коде Swift операции ARC способны потреблять до 80 % процессорного времени. Сравнительное исследование [4] подтверждает существенную стоимость управления памятью через подсчет ссылок относительно языков с моделью владения.

2.4. Семантика Copy-On-Write. Коллекции стандартной библиотеки Swift (Array, Dictionary, Set, String) формально являются значимыми типами, но скрывают внутри себя ссылку на heap-буфер с данными [11]. Перед мутирующей операцией исполняющая система через примитив isKnownUniquelyReferenced проверяет уникальность владения буфером. При разделенном владении выполняется полное копирование O(N) перед мутацией. Механизм позволяет передавать массивы по значению без явного дублирования. При случайном триггере COW в горячем цикле производительность падает на порядки.

2.5. Микроархитектура Apple Silicon. Процессор M3 Pro сохраняет специфические для Apple Silicon параметры предыдущих поколений M-series: строка кэша 128 байт, L1D-кэш производительного ядра 128 КБ, общий L2 кластера производительных ядер 12 МБ [6, 8]. Кэш системного уровня реализован как эксклюзивный относительно CPU L1/L2: данные в L1 или L2 не дублируются в SLC, при вытеснении из L2 они переносятся в SLC [7]. Политика расширяет суммарный объем SRAM, доступный для последовательного потока данных, но усугубляет ущерб от хаотичных обращений, провоцирующих непрерывные миграции строк между уровнями.

3. Методика эксперимента

3.1. Сценарии тестирования. Разработаны четыре сценария. Каждый изолирует один эффект. S1 (базовый): тип PrimitiveStruct с четырьмя полями Int (32 байта) и его зеркальный аналог PrimitiveClass; операция – итерация массива с суммированием поля a в локальную переменную. S2 (reference-поле в struct): тип StringStruct с полями id: Int, name: String, score: Double, active: Bool и аналог StringClass. Тип String в Swift содержит ссылку на heap-буфер, что провоцирует ARC-обращения даже из значимой обертки. S3 (Copy-On-Write): тип MutableStruct (4 × Int); сравниваются две стратегии модификации – передача массива в функцию по значению с последующей мутацией (триггер COW) и передача через inout (мутация на месте). S4 (реалистичная цепочка): те же типы, что в S1; операция filter { $0.a % 5 == 0 }.map { ... }.sorted(by: <).

3.2. Конфигурация. Измерения проведены на MacBook Pro 14" с процессором Apple M3 Pro, ОС macOS 26.4.1, Xcode 26.3. Сборка – Release-конфигурация с флагом оптимизации -O и включенным Whole Module Optimization (-wmo) [9, 11]. Симулятор сознательно исключен – все измерения сделаны на физическом оборудовании, поскольку только так аппаратные счетчики дают валидные показания. Размеры коллекций: $N \in \{10^3, 10^4, 10^5, 10^6, 5 \cdot 10^6\}$. Массив 10^5 экземпляров PrimitiveStruct занимает 3,2 МБ (помещается в L2 = 12 МБ), массив 10^6 – 32 МБ (выходит за L2 и опирается на полосу пропускания DRAM).

3.3. Аппаратные счетчики. Для разделения вкладов layout и ARC использован шаблон CPU Counters в Xcode Instruments [12]. Снимались события L1D_CACHE_MISS_LD (промахи L1 при load-инструкциях) и INST_ALL (общее число retired-инструкций). Apple предоставляет ограниченный набор физических PMC-регистров, профилировщик мультиплексирует счетчики, поэтому длительность измерения выбиралась достаточной для статистической сходимости.

3.4. Защита от Dead Code Elimination. Оптимизирующий компилятор LLVM при отсутствии side-эффектов от тела цикла способен полностью удалить итерацию посредством Dead Code Elimination [13]. Для предотвращения эффекта реализована функция blackHole<T>, направляющая результат в глобальное хранилище через вспомогательную функцию с атрибутами @inline(never) и @_optimize(none). Атрибуты запрещают встраивание и оптимизации внутри тела функции, что гарантирует сохранность цикла. Замер времени, реализованный через DispatchTime.now().uptimeNanoseconds, охватывает исключительно итерацию и не включает создание массива.

3.5. Статистическая обработка. Для каждой точки (тип × N × сценарий) выполнено 5 независимых прогонов [14]. Полученные значения упорядочены, минимум и максимум отброшены, медиана средних трех принята за результат

точки. Подход устраняет влияние выбросов, обусловленных активностью операционной системы и термальным регулированием частоты процессора.

4. Результаты и обсуждение

Таблица 1 – Время выполнения сценариев S1 и S4, мс

N	**S1: чистая итерация**			**S4: filter + map + sorted**		
	Struct, мс	Class, мс	Отн.	Struct, мс	Class, мс	Отн.
10^3	0,000333	0,000167	0,50	0,004917	0,007625	1,55
10^4	0,003708	0,005166	1,39	0,039125	0,072209	1,85
10^5	0,033167	0,078791	**2,38**	0,426125	0,824583	1,94
10^6	0,664125	0,818834	1,23	5,360000	14,153791	2,64
$5 \cdot 10^6$	2,717625	4,135375	1,52	30,373417	75,975625	2,50

4.1. Сценарий S1: переломная точка. Отношение времени class/struct демонстрирует немонотонную зависимость от N. При $N=10^3$ значение 0,50 означает, что массив class оказался быстрее: накладные расходы измерительной обвязки соизмеримы с длительностью самого цикла, а эффект усреднения недостаточен для подавления шума. При $N=10^4$ отношение достигает 1,39, при $N=10^5$ – пика 2,38. Природу пика объясняет иерархия кэшей.

Природа пика объясняется иерархией кэшей. Массив 10^5 PrimitiveStruct занимает 3,2 МБ, что составляет четверть от L2 (12 МБ). Все строки кэша помещаются в L2, после первого прогона цикла данные полностью разогреты, и итерация выполняется со скоростью, ограниченной полосой пропускания L2. Массив 10^5 PrimitiveClass хранит 800 КБ указателей плюс 10^5 heap-объектов, каждый из которых выровнен на отдельную аллокацию; общий объем heap-данных превышает 4 МБ, но критично иное – они фрагментированы, и для каждого объекта требуется независимое обращение по непредсказуемому адресу. Аппаратный prefetcher неспособен экстраполировать шаг, поскольку адрес следующего объекта определяется содержимым текущего [2].

При $N=10^6$ отношение падает до 1,23. Массив struct (32 МБ) выходит за пределы L2 и становится memory-bandwidth limited; массив class также упирается в полосу пропускания DRAM. В этом режиме абсолютная стоимость доступа к DRAM доминирует над разницей в количестве промахов, и относительное преимущество struct сокращается. При $N=5 \cdot 10^6$ отношение восстанавливается до 1,52. Продолжительная последовательная итерация позволяет prefetcher уверенно распознать линейный шаг доступа массива struct и поддерживать поток данных близко к пиковой полосе пропускания DRAM, тогда как массив class по-прежнему генерирует случайные адреса.

4.2. Сценарий S2: деградация преимущества при наличии String-поля. Одно reference-поле типа String внутри struct меняет картину. При $N=10^5$ отношение падает с 2,38 (S1) до 1,34 – на 44 %. При $N=10^6$ отношение стабилизируется на 1,35, при $N=5\cdot10^6$ снижается до 1,17. Причина – расположение строкового буфера: тип String хранит указатель на heap-буфер с символьными данными, а ARC обновляет счетчик ссылок этого буфера при обращении [3]. Итерация массива StringStruct сочетает сильные стороны value-семантики обертки (контейнер последовательный) и слабые стороны ссылочного String внутри (heap-доступ и ARC). Узкое место смещается с layout контейнера на сам String, что выравнивает производительность struct и class.

4.3. Сценарий S3: линейный рост стоимости Copy-On-Write.

Таблица 2 – Стоимость COW-копирования и inout-мутации, мс

N	COW-копия, мс	Inout, мс	Отношение
10^3	0,000542	0,000083	6,53
10^4	0,004709	0,000083	56,73
10^5	0,045916	0,000084	546,62
10^6	0,864166	0,000500	**1728,33**
$5\cdot10^6$	3,346000	0,002500	1338,40

Стоимость inout-мутации практически не зависит от N – операция модифицирует один элемент массива и имеет сложность O (1). Стоимость COW-копирования растет линейно с N, что подтверждает теоретическую сложность O(N) полного дублирования буфера через memcpy при срабатывании isKnownUniquelyReferenced [11]. Отношение между стратегиями достигает 1728 при $N=10^6$ и слегка снижается до 1338 при $N=5\cdot10^6$ – последнее объясняется тем, что и inout-замер начинает накапливать измеримое время. Случайный COW-триггер в горячем цикле – типичный сценарий деградации: достаточно одной операции var copy = arr с последующей мутацией copy[i] = …, чтобы стоимость операции выросла на три порядка.

4.4. Сценарий S4: практический результат. В цепочке filter + map + sorted отношение монотонно возрастает с N, достигая 2,64 при $N=10^6$ и 2,50 при $N=5\cdot10^6$. Каждый из трех проходов индуцирует обращения к коллекции, и для массива class каждый проход независимо страдает от pointer chasing и ARC. Кумулятивный эффект делает разрыв более выраженным, чем в S1, где замер охватывал единственный проход с суммированием.

4.5. Валидация аппаратными счетчиками.

Таблица 3 – Показания PMC для функции benchmarkPrimitiveIteration

Метрика	Struct-режим	Class-режим	Отношение
L1D_CACHE_MISS_LD	90 661 181	122 666 532	1,35
INST_ALL	23 902 869 650	27 310 680 171	1,14
Семплы профилировщика	1015 (20,8 %)	1198 (24,9 %)	–

Превышение числа промахов L1D у class в 1,35 раза – прямое аппаратное подтверждение центральной гипотезы исследования. Превышение retired-инструкций на 14 % при идентичной алгоритмической логике дает прямую оценку ARC-overhead: компилятор внедряет дополнительные машинные инструкции в каждое обращение к ссылочному типу. Это подтверждает и call tree профиля. В режиме class в горячей части цикла присутствуют функции swift_allocObject и swift::RefCounts<...>::increment – в struct-режиме их нет. Эти функции реализуют атомарное обновление счетчика ссылок и аллокацию объектов; их попадание в hot path визуально подтверждает корреляцию между типом данных и динамикой памяти.

4.6. Сопоставление с известными работами. Полученные результаты согласуются с выводами [1] о превосходстве Data-Oriented Design на C++/x86 и распространяют их на платформу Apple Silicon с поправкой на 128-байтную строку кэша и эксклюзивную политику SLC [7]. Уникальный вклад работы – раздельная количественная оценка двух источников преимущества struct: вклада layout (через S1, S4 и счетчик L1D_CACHE_MISS_LD) и вклада отсутствия ARC (через INST_ALL и сценарий S2).

5. Выводы и рекомендации

Проведенное экспериментальное исследование позволяет сформулировать следующие количественные выводы.

1. При итерации массивов с примитивными полями (сценарий S1) на процессоре Apple M3 Pro преимущество значимых типов над ссылочными достигает максимума 2,38× при N=100 000 и снижается до 1,23× при N=1 000 000 вследствие вытеснения обоих типов из L2-кэша в оперативную память, после чего восстанавливается до 1,52× при N=5 000 000 благодаря эффективной работе аппаратного prefetcher на последовательном паттерне доступа.

2. Включение в структуру одного поля ссылочного типа String (сценарий S2) сокращает преимущество локальности с 2,38× до 1,34× при N=100 000, что соответствует снижению на 44 %. Полученный результат опровергает распространенное убеждение о безопасности значимых типов от ARC-overhead. Критичен не тип контейнера, а тип полей внутри него.

3. Стоимость Copy-On-Write при мутации через параметр-значение (сценарий S3) растет линейно с размером коллекции и при N=1 000 000 превышает стоимость in-place-мутации через inout в 1728 раз. Это согласуется с теоретической сложностью O(N) против O(1).

4. В реалистичной цепочке операций filter + map + sorted (сценарий S4) массив значимых типов на M3 Pro выполняется в 2,64 раза быстрее массива ссылочных типов при N=1 000 000, причем преимущество монотонно возрастает с N в исследованном диапазоне.

5. Аппаратные счетчики Xcode Instruments зафиксировали превышение числа промахов L1D-кэша у class над struct в 1,35 раза и общего числа retired-инструкций в 1,14 раза, что разделяет вклад двух механизмов деградации: примерно 1,35× обусловлено layout-эффектами (промахи кэша), оставшийся разрыв до 2,38× – стоимостью ARC-инструкций на уровне retain/release.

Практические рекомендации. В горячих циклах итерации больших коллекций ($N \geq 10^4$) предпочтительно использовать значимые типы с примитивными полями. Избегайте передачи массивов по значению с последующей мутацией копии – это типичный источник скрытой COW-деградации на три порядка. При проектировании высокопроизводительных структур данных учитывайте, что reference-типы внутри struct (String, замыкания, Optional ссылочных типов) частично нейтрализуют преимущества layout.

Ограничения исследования. Результаты получены на Apple M3 Pro и распространяются на M-series производительные ядра. Поведение E-ядер и процессоров серии A, используемых в iPhone, может отличаться из-за иной конфигурации L1/L2. Измерения проведены в однопоточном режиме; многопоточные сценарии с разделяемыми коллекциями требуют отдельного исследования из-за эффектов когерентности кэшей и стоимости атомарных операций ARC между ядрами. Сравнение с результатами [1] на платформе x86 носит качественный характер, поскольку различия архитектур (64- против 128-байтной строки кэша, инклюзивная против эксклюзивной политики последнего уровня) препятствуют прямому численному сопоставлению.

Перспективы развития. Дальнейшие исследования предполагается направить на анализ SIMD-векторизации операций над массивами struct, оценку влияния модели владения noncopyable языка Swift 6, а также измерение производительности при использовании unsafe-указателей и контигуальных хранилищ через UnsafeMutableBufferPointer и ContiguousArray.

Список литературы:

1. Impact of Data-Oriented and Object-Oriented Design on Performance and Cache Utilization with Artificial Intelligence Algorithms in Multi-Threaded CPUs [Электронный ресурс] / G. M. Arantes, G. Lucca, E. N. Borges [и др.] // arXiv. – 2025. – arXiv:2512.07841. – URL: https://arxiv.org/abs/2512.07841 (дата обращения: 18.05.2026).

2. Accelerating Pointer Chasing in 3D-Stacked Memory: Challenges, Mechanisms, Evaluation / K. Hsieh, S. Khan, N. Vijaykumar [и др.] // Proceedings of the 34th IEEE International Conference on Computer Design (ICCD). – 2016. – P. 25–32. DOI: 10.1109/ICCD.2016.7753257

3. Ungar D. M., Grove D., Franke H. Dynamic atomicity: optimizing swift memory management // Proceedings of the 13th ACM SIGPLAN International Symposium on Dynamic Languages (DLS 2017). – New York: ACM, 2017. – P. 15–26. DOI: 10.1145/3133841.3133843

4. Torar C. Y., Manggala G., Ngantung M. J. Ownership and memory safety issues in Rust and Swift // International Journal of Computer Applications. – 2021. – Vol. 183, № 22. – P. 1–10.

5. Oruç K. Value and Reference Type Semantics in iOS: Swift Performance Master Series [Электронный ресурс] // Medium. – 2023. – URL: https://medium.com/@kadiroruc/value-and-reference-type-semantics-ios-swift-performance-master-series-part-3-f81ce2e83349 (дата обращения: 18.05.2026).

6. Wrenger L., Töllner D., Lohmann D. Analyzing the memory ordering models of the Apple M1 // Journal of Systems Architecture. – 2024. – Vol. 149. – Art. 103102. DOI: 10.1016/j.sysarc.2024.103102 EDN: WCLHZA

7. Xu T., Ding A. A., Fei Y. EXAM: Exploiting Exclusive System-Level Cache in Apple M-Series SoCs for Enhanced Cache Occupancy Attacks // Proceedings of the 20th ACM Asia Conference on Computer and Communications Security (ASIA CCS 2025). – New York: ACM, 2025. DOI: 10.1145/3708821.3710844

8. Lam C. A Brief Look at Apple's M2 Pro iGPU [Электронный ресурс] // Chips and Cheese. – 2023. – URL: https://chipsandcheese.com/p/a-brief-look-at-apples-m2-pro-igpu (дата обращения: 18.05.2026).

9. Explore Swift performance: WWDC24 Session 10217 [Электронный ресурс] / Apple Inc. – 2024. – URL: https://developer.apple.com/videos/play/wwdc2024/10217/ (дата обращения: 18.05.2026).

10. Understanding Swift Performance: WWDC16 Session 416 [Электронный ресурс] / Apple Inc. – 2016. – URL: https://developer.apple.com/videos/play/wwdc2016/416/ (дата обращения: 18.05.2026).

11. Writing High-Performance Swift Code: Whole Module Optimizations [Электронный ресурс] / Swift Open-Source Project. – URL: https://github.com/swiftlang/swift/blob/main/docs/OptimizationTips.rst (дата обращения: 18.05.2026).

12. Detecting Memory-Boundedness with Hardware Performance Counters / D. Molka, R. Schöne, D. Hackenberg, W. E. Nagel // Proceedings of the 8th ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering (ICPE '17). – New York: ACM, 2017. – P. 27–38. DOI: 10.1145/3030207.3030223

13. Sandoval Alcocer J. P., Bergel A., Valente M. T. Automatic Microbenchmark Generation to Prevent Dead Code Elimination and Constant Folding // Proceedings of the 31st IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE). – 2016. – P. 132–143.

14. Sestoft P. Microbenchmarks in Java and C# [Электронный ресурс]: tech. rep. / IT University of Copenhagen. – 2015. – P. 1-25. – URL: https://www.itu.dk/~sestoft/papers/benchmarking.pdf (дата обращения: 18.05.2026).

15. Биматов Д. В., Сущенко С. П. Анализ производительности многоуровневой подсистемы памяти [Электронный ресурс] // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – URL:

https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-proizvoditelnosti-mnogourovnevoy-podsistemy-pamyati (дата обращения: 18.05.2026).

16. Егунов В. А., Шабаловский В. А. Технологии кеширования данных в современных микропроцессорах [Электронный ресурс] // Известия Волгоградского государственного технического университета. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-keshirovaniya-dannyh-v-sovremennyh-mikroprotsessorah (дата обращения: 18.05.2026).

УДК 004.78:339.37

Газизов А. Р., Кохан Д. С.
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕБ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ЗАКАЗОВ В ОПТОВОЙ ТОРГОВЛЕ БЫТОВОЙ ХИМИЕЙ

Аннотация: в статье рассматриваются вопросы проектирования веб-ориентированной информационной системы, предназначенной для автоматизации управления товарным каталогом и обработки заказов предприятия оптовой торговли бытовой химией. Проведен анализ особенностей предметной области и определены основные требования к разрабатываемому программному решению. Предложена архитектура системы, обеспечивающая централизованное хранение данных, обработку пользовательских запросов и поддержку административного управления. Рассмотрены функциональные возможности системы, включая механизмы фильтрации товаров и обработки заказов. Разработанное решение может быть использовано для повышения эффективности управления торговыми процессами.

Ключевые слова: информационная система, автоматизация торговли, веб-приложение, обработка заказов, управление каталогом товаров, база данных, клиент-серверная архитектура, HTML, CSS, Java Script.

Введение

Предприятия торговой сферы активно внедряют цифровые инструменты для повышения эффективности управления внутренними процессами. Одним из ключевых направлений автоматизации является внедрение информационных систем, позволяющих централизованно обрабатывать данные о товарах, заказах и клиентах [4, с. 27-31].

Для предприятий оптовой торговли данная задача имеет особую значимость, поскольку такие организации работают с большим объемом товарных позиций, множеством заказов и необходимостью постоянного контроля складской информации. Использование традиционных методов учета, включая электронные таблицы или разрозненные программные решения, зачастую приводит к замедлению рабочих процессов, увеличению количества ошибок и снижению качества обслуживания [4, с. 84-89].

Веб-ориентированные информационные системы позволяют обеспечить доступ к данным из различных точек, централизовать управление информацией и повысить оперативность принятия решений. Использование клиент-серверной архитектуры позволяет создавать гибкие программные решения, адаптированные под специфику конкретного предприятия [4, с. 112-118].

Целью данной работы является проектирование веб-ориентированной информационной системы автоматизации управления каталогом товаров и обработки заказов предприятия оптовой торговли бытовой химией.

Особенности автоматизации оптовой торговли бытовой химией

Сфера оптовой торговли бытовой химией характеризуется широким ассортиментом продукции, включающим моющие средства, чистящие составы, средства личной гигиены, расходные материалы и сопутствующие товары. Управление таким объемом данных требует эффективной системы хранения, обработки и поиска информации [2, с. 45-52].

К основным проблемам, возникающим при отсутствии специализированной информационной системы, относятся:

1) затрудненный оперативный поиск товарных позиций среди большого ассортимента продукции;

2) высокая вероятность ошибок при обработке заказов;

3) отсутствие централизованного механизма аналитического учета;

4) сложность оперативного обновления информации о товарах;

5) недостаточная прозрачность бизнес-процессов.

Для решения указанных задач требуется система, обеспечивающая структурированное хранение информации, поддержку фильтрации данных и автоматизацию основных операций, связанных с обработкой заказов.

В качестве подхода к реализации выбран формат веб-ориентированного приложения, поскольку он обеспечивает универсальность доступа и не требует установки специализированного клиентского программного обеспечения.

Проектирование архитектуры информационной системы

Разрабатываемая система построена на основе клиент-серверной архитектуры, предполагающей разделение пользовательского интерфейса, серверной логики и уровня хранения данных [4, с. 135-142].

В структуре системы можно выделить следующие основные компоненты:

1) клиентский уровень - данный компонент обеспечивает взаимодействие пользователя с системой посредством веб-браузера. На данном уровне реализуются элементы интерфейса, отображение данных, формы взаимодействия и механизмы пользовательского ввода;

2) серверный уровень – серверная часть отвечает за обработку пользовательских запросов, реализацию бизнес-логики, выполнение операций с данными и передачу результатов клиентской части;

3) уровень хранения данных - для хранения информации используется реляционная база данных;

4) административный модуль – специализированный интерфейс, предназначенный для управления содержимым каталога, обработки поступающих заказов и контроля работы системы.

При проектировании архитектуры особое внимание уделялось масштабируемости и возможности дальнейшего функционального расширения.

Реализация ключевых функциональных модулей

Технологическая реализация системы выполнена с использованием веб-ориентированного программного стека, обеспечивающего разработку клиентской и серверной частей приложения.

Клиентская часть разработана с использованием HTML5 [5], CSS3 и JavaScript [6]. HTML5 обеспечивает формирование структуры интерфейса, CSS3 отвечает за визуальное оформление и адаптивность пользовательских страниц, а JavaScript реализует интерактивное взаимодействие с элементами системы.

Серверная часть реализована на языке PHP, который обеспечивает обработку HTTP-запросов, взаимодействие с базой данных и выполнение прикладной логики [1, с. 115-138].

В качестве системы управления базами данных используется MySQL, позволяющая организовать структурированное хранение данных и эффективное выполнение запросов [2, с. 97-116].

Модуль управления каталогом товаров

Одним из ключевых элементов системы является модуль управления товарным каталогом. Он обеспечивает добавление, редактирование, удаление и отображение товарных позиций.

Для повышения удобства работы реализована структура хранения, позволяющая систематизировать продукцию по категориям и характеристикам.

Модуль фильтрации товаров

Поскольку каталог содержит большое количество товарных позиций, важной функциональной составляющей является механизм фильтрации.

Пользователь получает возможность выполнять поиск продукции по нескольким параметрам одновременно, включая:

1) категорию товара;

2) ценовой диапазон;

3) текстовые характеристики;

4) дополнительные атрибуты продукции.

Фильтрация реализуется посредством формирования параметризованных запросов к базе данных, что позволяет повысить производительность и безопасность системы [1, с. 241-255].

Модуль обработки заказов

Функционал обработки заказов обеспечивает регистрацию новых заказов, изменение их статуса, хранение информации о клиентах и контроль выполнения операций.

Автоматизация данного процесса позволяет сократить время обработки заявок и минимизировать вероятность ошибок, связанных с ручным вводом данных.

Аналитический модуль

Для повышения эффективности управленческого контроля в системе предусмотрен аналитический функционал, позволяющий выполнять обработку накопленных данных о заказах и товарных позициях. Использование аналитических инструментов обеспечивает получение статистической информации о динамике заказов, востребованности отдельных категорий продукции и распределении спроса [3, с. 188-194]. Это способствует принятию более обоснованных решений при управлении ассортиментом и планировании дальнейшей деятельности предприятия.

Оценка практической применимости решения

Разработанная информационная система позволяет автоматизировать основные процессы управления товарным каталогом и обработки заказов предприятия оптовой торговли бытовой химией [3, с. 201-208].

Использование веб-технологий обеспечивает возможность централизованного хранения информации и удаленного доступа к системе. Реализованные механизмы фильтрации ускоряют поиск необходимой продукции, а аналитические инструменты позволяют получать статистические сведения о деятельности предприятия.

Дополнительным преимуществом разработанного решения является возможность дальнейшего расширения функциональности системы за счет внедрения новых модулей и интеграции с внешними сервисами.

Заключение

В результате работы была разработана веб-ориентированная информационная система автоматизации обработки заказов и управления товарным каталогом предприятия оптовой торговли бытовой химией.

Предложенное решение обеспечивает хранение и обработку данных о товарах и заказах, предоставляет инструменты фильтрации продукции и реализует функции аналитической обработки информации. Использование клиент-серверной архитектуры позволило обеспечить разделение функциональных компонентов системы и повысить удобство сопровождения программного решения.

Разработанная система может быть использована в качестве основы для дальнейшего развития и внедрения в деятельность предприятий оптовой торговли [3, с. 214-218].

Списък литературы:

1. Зандстра, Мэтт. PHP. Объекты, шаблоны и методики программирования / М. Зандстра; перевод с английского И. В. Берштейна под редакцией С. Г. Тригуб. – 5-е изд. – Москва, Санкт-Петербург: Диалектика; Диалектика, 2019. – 736 с.

2. Кузнецов С. Д. Введение в модель данных SQL: учебное пособие / С. Д. Кузнецов. – Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2021. – 350 с. ISBN 978-5-4497-0873-1.

3. Маркин А. В. Теория и практика создания web-ориентированных информационных систем: учебное пособие для магистрантов / А. В. Маркин, А. В. Куликова. – Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2022. – 231 с. ISBN: 978-5-4497-1603-3 EDN: WKABWN

4. Рощин С.М. Современные интернет-технологии: семь главных трендов / С.М. Рощин. – Москва: Дашков и К, 2022. – 124 с. ISBN: 978-5-394-04846-3 EDN: EHRQCW

5. Mozilla Developer Network. HTML: HyperText Markup Language: [Электронный ресурс]. – URL: https://developer.mozilla.org/ru/docs/Web/HTML (дата обращения: 01.04.2026).

6. Mozilla Developer Network. JavaScript Reference: [Электронный ресурс]. – URL: https://developer.mozilla.org/ru/docs/Web/JavaScrip (дата обращения: 02.04.2026).

УДК 004.932.2

Еремишин Н. Н.
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СКАНИРОВАНИЯ ДВУМЕРНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ КОДОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ И ПРЕДОБРАБОТКИ

Аннотация: в статье рассматривается задача локализации и предобработки одномерных и двумерных кодов (штрихкодов, QR-кодов, DataMatrix) на мобильных устройствах в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Актуальность обусловлена растущим использованием камер смартфонов в качестве замены физических сканеров в ритейле, складской логистике, фармацевтике и других отраслях, где критичны скорость и надежность распознавания.

Предложен конвейер обработки, включающий детекцию кодов в кадре и последующую предобработку выделенной области перед передачей существующему декодеру. Для этапа детекции проведено сравнение легких моделей – архитектуры Жаркова, YOLOv11-nano и NanoDet – по точности, скорости инференса и размеру модели, а также обосновано применение специализированной компактной модели-детектора для QR-кодов. Приведено описание используемых датасетов и стратегии их формирования.

Практическая значимость работы определяется рядом сценариев, в которых повышение эффективности сканирования кодов имеет экономическое значение. В ритейле коды используются для учёта товаров на кассах и в системах самообслуживания, в складской логистике штрихкоды и двумерные коды обеспечивают отслеживание перемещения грузов на каждом этапе доставки. Таким образом, предложенные в работе методы локализации и предобработки позволяют повысить

Ключевые слова: модель детекции, штрихкод, QR-код, компьютерное зрение, суперразрешение, инференс.

Введение

Автоматическая идентификация объектов с помощью штрихкодов, QR-кодов и DataMatrix – стала частью повседневной практики множества отраслей. В ритейле коды используются для учета товаров на кассах и в системах самообслуживания, в складской логистике – для отслеживания перемещения грузов, в фармацевтике – для маркировки и верификации лекарственных средств, в общественном питании – для работы с электронными меню и системами заказов. Во всех этих сценариях классическим инструментом считывания служит физический сканер – устройство с лазерным или матричным считывателем.

Однако применение выделенного сканера не всегда оправдано или возможно. Курьеры, мерчандайзеры, работники небольших торговых точек и аптек часто не имеют при себе специализированного оборудования, но располагают смартфоном. Камера мобильного устройства в сочетании с программным обеспечением способна заменить физический сканер, снижая затраты на оборудование и упрощая рабочий процесс. Вместе с тем мобильное сканирование предъявляет более жесткие требования к алгоритмам обработки изображений: вычислительные ресурсы телефона ограничены, а условия съемки неконтролируемы. Коды могут быть повреждены, частично перекрыты, сняты под углом, при слабом освещении или с большого расстояния, когда код занимает малую часть кадра.

Задача считывания кода с камеры смартфона разделяется на два этапа: локализацию кода в кадре и его декодирование. Для декодирования существуют открытые библиотеки – ZXing, ZBar и другие, – которые работают при условии, что на вход подается корректно выделенная и подготовленная область изображения. Таким образом, итоговое качество распознавания определяется в том числе этапами, предшествующими декодированию: обнаружением кода и предобработкой выделенного фрагмента.

Локализация кодов в произвольном кадре представляет собой задачу детекции. В условиях мобильного исполнения необходимы модели с малым числом параметров и высокой скоростью инференса. В настоящей работе рассматриваются три архитектуры: архитектура Жаркова [1], YOLOv11-nano [2, 3] и NanoDet [4]. Каждая из них имеет свои особенности по соотношению точности и производительности, что определяет выбор в зависимости от целевого устройства и сценария использования.

Помимо выбора модели для детекции, важен выбор инференс-фреймворка для исполнения модели на мобильном устройстве. В работе проведено сравнение ONNX Runtime [5], NCNN [6] и OpenCV DNN по латентности.

После локализации кода необходима предобработка, цель которой – привести выделенную область к виду, пригодному для декодирования. Сюда входят выпрямление перспективных искажений, доворот одномерных штрихкодов в горизонтальное положение, адаптивная бинаризация, а также управление разрешением: снижение для ускорения обработки крупных кодов и применение суперразрешения для мелких, занимающих незначительную часть кадра.

Цель данной работы – построение цепочки алгоритмов для локализации и предобработки кодов, пригодной для работы в реальном времени на мобильных устройствах.

1. Обзор существующих библиотек декодирования кодов

Для декодирования одномерных и двумерных кодов (QR, DataMatrix, EAN, Code128 и др.) наибольшее распространение получили две открытые библиотеки: ZXing [7] и ZBar. Они существенно различаются по архитектуре, набору поддерживаемых форматов и эффективности работы.

ZXing изначально разработана компанией Google на языке Java и впоследствии портирована на C++. Для QR-кодов выполняется обнаружение трех finder-паттернов методом анализа строковых переходов (чередование черных и белых модулей в соотношении 1:1:3:1:1); для DataMatrix ищутся L-образная граница и такт-линия. По найденным опорным точкам строится матрица перспективного преобразования, изображение кода приводится к фронтальному виду, после чего происходит считывание кода. Скомпилированная статическая библиотека zxing-cpp (v3.0) для архитектуры arm64-v8a занимает около 800 КБ.

ZBar – библиотека, написанная на языке C, ориентированная на высокую скорость работы с видеопотоком. В библиотеке изображение анализируется горизонтальными и вертикальными проходами для обнаружения переходов интенсивности, найденные переходы группируются для определения границ штрихов. Скомпилированная библиотека libzbar.so для arm64-v8a составляет 1,3 МБ. Для оценки практической эффективности обеих библиотек было проведено тестирование на выборке из 500 изображений, содержащих QR-коды и линейные коды (EAN-13, Code 128), снятых в различных условиях: нормальное освещение, слабое освещение, наклон до 45°, частичное перекрытие, малый размер кода. ZXing демонстрирует существенно более высокую долю успешного декодирования практически во всех сценариях. На основании проведенного анализа в качестве декодера для разрабатываемой системы выбрана библиотека ZXing-cpp.

2. Сравнительный анализ алгоритмов детекции кодов

Перед тем как передать изображение кода в декодер ZXing, необходимо определить местоположение кода в кадре. Задача детекции состоит в том, чтобы найти прямоугольную область, содержащую код, и передать ее на дальнейшую обработку.

Для сканирования были рассмотрены и обучены три модели: модель Жаркова, NanoDet и YOLOv11-nano. Все три модели обучались и тестировались на входном разрешении 960×960 пикселей, что необходимо для обнаружения кодов на значительном расстоянии от камеры, когда в поле зрения попадает сразу несколько объектов.

Модель Жаркова представляет собой наиболее компактную из рассмотренных архитектур. Ее принцип работы отличается от классических детекторов: вместо предсказания ограничивающих рамок модель формирует карту вероятностей, на которой каждому пикселю присваивается значение, отражающее степень его принадлежности к области кода. По этой карте затем

восстанавливаются контуры отдельных кодов, что дает не только информацию о положении, но и о форме области, позволяя в дальнейшем выполнить геометрическое выпрямление.

Однако на практике качество формируемой карты вероятностей оказалось неудовлетворительным при работе с кодами малого размера. Когда код занимает небольшую долю площади кадра, модель не может сформировать четкую и связную область высокой вероятности – карта получается размытой, фрагментированной, с низким контрастом между фоном и областью кода. В ходе экспериментов предпринимались попытки улучшить результат за счет обучения на различных наборах данных и варьирования входного разрешения, однако проблема воспроизводилась устойчиво: при мелких кодах карта вероятностей оставалась некачественной вне зависимости от параметров обучения.

Еще одним недостатком модели Жаркова является скорость работы на изображениях высокого разрешения. Поскольку модель формирует попиксельную карту вероятностей, объем вычислений растет пропорционально площади входного изображения. На разрешении 960×960 время инференса оказывается значительно выше, чем у моделей, работающих через предсказание ограничивающих рамок.

Вместе с тем модель Жаркова хорошо справляется со сценариями, в которых код находится близко к камере и занимает значительную часть кадра. В этих условиях карта вероятностей формируется качественно, контур кода обводится точно, а возможность геометрического выпрямления по контуру является безусловным преимуществом.

NanoDet и YOLOv11-nano представляют собой компактные модели, предсказывающие ограничивающие рамки объектов [8, 9, 10, 11]. Обе модели были обучены на разрешении 960×960 пикселей для обнаружения кодов с дальнего расстояния в режиме множественного сканирования.

По результатам тестирования обе модели показали сопоставимую эффективность, при этом YOLOv11-nano продемонстрировала несколько более высокие показатели точности. Разница наиболее заметна на мелких кодах и кодах, снятых под углом: YOLOv11-nano увереннее детектирует объекты, которые NanoDet.

По размеру модели выигрывает NanoDet. Веса YOLOv11-nano занимают около 5 МБ, NanoDet – около 2 МБ.

Важно отметить, что обе модели дают только координаты ограничивающей рамки и не предоставляют информации о форме области кода или его ориентации. Это означает, что задачи выпрямления и перспективной коррекции должны решаться на последующих этапах конвейера средствами модуля предобработки.

Модель Жаркова, несмотря на минимальный размер и встроенную возможность построения контура, непригодна для дальней и множественной детекции из-за низкого качества карты вероятностей на мелких кодах и высокого времени инференса на больших разрешениях. Ее применение оправдано лишь в сценарии ближней съемки.

Между NanoDet и YOLOv11-nano выбор сделан в пользу NanoDet в следствие меньшего размера модели.

3. Сравнение инференс-фреймворков

При развертывании нейросетевых моделей на мобильных устройствах критически важен выбор инференс-фреймворка, который обеспечит минимальную задержку и эффективное использование вычислительных ресурсов процессора. Рассмотрим три решения – ONNX Runtime от Microsoft, NCNN от Tencent и MNN от Alibaba – различаются по архитектурным подходам, степени оптимизации под ARM-процессоры и поддержке SIMD-инструкций.

NCNN – это высокопроизводительный фреймворк для инференса нейронных сетей, изначально спроектированный компанией Tencent специально для мобильных платформ. Ключевая особенность NCNN заключается в глубокой интеграции с набором SIMD-инструкций ARM NEON [12] на уровне ядра вычислений. Операции сверток, матричных умножений и активаций реализованы с прямым использованием интринсиков NEON, что позволяет одновременно обрабатывать несколько элементов данных в одном такте процессора. Благодаря этому NCNN достигает исключительно низкой латентности при работе на ARM-чипах, характерных для смартфонов и встраиваемых систем.

Фреймворк не имеет внешних зависимостей и компилируется в компактную библиотеку, что существенно упрощает интеграцию в мобильные приложения. NCNN поддерживает квантизацию моделей до INT8 [14] с сохранением SIMD-ускорения, что дополнительно снижает нагрузку на процессор и уменьшает потребление памяти. Помимо ARM NEON, фреймворк также поддерживает Vulkan для GPU-ускорения на мобильных устройствах.

MNN разработан компанией Alibaba [13] и, подобно NCNN, ориентирован на edge-устройства и мобильные платформы. Архитектура MNN построена вокруг высокоэффективного ядра, которое активно использует SIMD-инструкции ARM NEON для векторизации вычислений.

Отличительной чертой MNN является его гибкость: помимо инференса, фреймворк поддерживает обучение моделей непосредственно на устройстве. MNN обеспечивает компактный размер бинарного файла и минимальное потребление оперативной памяти. Недавняя интеграция с библиотекой Arm KleidiAI дополнительно ускорила выполнение операций на современных ARM-процессорах, включая поддержку SME-расширений.

ONNX Runtime – это универсальный кроссплатформенный движок инференса, созданный Microsoft для выполнения моделей в формате ONNX. Его главное преимущество – широкая совместимость: фреймворк работает на Windows, Linux, macOS, Android и iOS, поддерживая множество аппаратных ускорителей через систему Execution Providers, включая TensorRT, OpenVINO и CoreML.

Однако в контексте ARM-мобильных устройств ONNX Runtime уступает NCNN и MNN по степени SIMD-оптимизации. Хотя фреймворк использует NEON-инструкции через библиотеку MLAS (Microsoft Linear Algebra Subroutines), уровень ручной оптимизации критичных ядер менее агрессивен, чем у фреймворков, специально созданных для мобильных ARM-процессоров. Бенчмарки показывают, что на задачах классификации и детекции NCNN и MNN могут опережать ONNX Runtime на ARM в несколько раз – по данным исследований, ускорение достигает 3–5 раз на ряде моделей. Размер бинарной библиотеки ONNX Runtime также заметно больше, что может быть критичным для мобильных приложений с ограниченным бюджетом на размер.

Роль SIMD в мобильном инференсе

SIMD (Single Instruction, Multiple Data) – это парадигма параллельных вычислений [15], при которой одна инструкция процессора одновременно выполняет операцию над несколькими элементами данных. На ARM-процессорах мобильных устройств эта парадигма реализована через набор инструкций NEON, который предоставляет 128-битные векторные регистры, способные обрабатывать четыре 32-битных числа с плавающей точкой или шестнадцать 8-битных целых за один такт.

Для инференса SIMD крайне критически важно, поскольку основные операции – свертки, матричные умножения и поэлементные преобразования – по своей природе хорошо поддаются векторизации. NCNN и MNN реализуют эти операции с прямым использованием NEON-интринсиков и ассемблерных вставок, что позволяет максимально эффективно задействовать аппаратные возможности процессора. ONNX Runtime также использует NEON, но в менее специализированном виде, отдавая приоритет универсальности и переносимости кода между различными архитектурами.

Для задач, требующих максимальной скорости инференса на мобильных ARM-устройствах, NCNN и MNN являются предпочтительным выбором. Оба фреймворка спроектированы с глубокой интеграцией SIMD-инструкций ARM NEON непосредственно в вычислительные ядра, что обеспечивает минимальную латентность и эффективное использование ресурсов процессора. ONNX Runtime остается сильным решением для кроссплатформенных сценариев, где важна совместимость с широким спектром моделей и аппаратных ускорителей, однако на ARM-инференсе он,

как правило, уступает специализированным мобильным фреймворкам по производительности.

4. Коррекция геометрии

После того как код обнаружен в кадре, перед передачей в декодер необходимо скорректировать его геометрию. В реальных условиях съемки код редко располагается строго фронтально – камера может быть наклонена, код наклеен на изогнутую поверхность или повернут относительно горизонтали. Без геометрической коррекции декодер получает искаженное изображение, что снижает долю успешного распознавания. Подход к коррекции зависит от того, каким способом был локализован код – через построение карты вероятностей или через ограничивающую рамку.

Если код был локализован моделью сегментации, на выходе имеется карта вероятностей, по которой можно восстановить контур области кода. В этом случае появляется возможность выполнить полноценное перспективное преобразование. Для этого применяется алгоритм аппроксимации контура четырехугольником – по найденному контуру ищутся четыре угловые точки, наилучшим образом описывающие форму кода. Реализация этого алгоритма доступна в виде библиотеки Quadrilateral Fitter, которая принимает произвольный контур и возвращает координаты четырех вершин.

По найденным четырем точкам строится матрица перспективного преобразования, и изображение кода приводится к прямоугольному фронтальному виду. Такой подход позволяет корректировать не только наклон, но и трапецеидальные искажения, возникающие при съемке под углом. Однако, как было показано в предыдущем разделе, качество карты вероятностей на мелких кодах остается низким, что приводит к неточному определению углов и, как следствие, к некорректному выпрямлению. Поэтому данный метод эффективен только в сочетании с моделью Жаркова при ближней съемке, когда контур кода восстанавливается достаточно точно.

Когда код обнаружен моделью детекции, предсказывающей ограничивающую рамку, информация о контуре области отсутствует. Выполнять дополнительную сегментацию для получения контура нецелесообразно, поскольку это увеличивает время обработки и усложняет конвейер. Вместе с тем декодер ZXing не выполняет коррекцию поворота изображения, и, если код существенно наклонен относительно горизонтали, доля успешного декодирования падает. Особенно это критично для линейных штрихкодов, которые чувствительны к углу поворота.

Для решения этой задачи применяется доворот кода на основе анализа ориентации штрихов. Алгоритм работает следующим образом. На вырезанном фрагменте изображения, соответствующем ограничивающей рамке, выполняется детекция прямых линий классическими методами – с использованием преобразования Хафа [16, 17]. Среди найденных линий

определяются вертикальные и близкие к вертикальным, после чего вычисляется преобладающее направление: ищется угол, при котором наибольшее количество обнаруженных линий оказываются параллельными друг другу. Этот угол соответствует углу наклона штрихов кода относительно вертикали. Изображение доворачивается на найденный угол, после чего штрихи оказываются ориентированы строго вертикально, что значительно упрощает работу декодера.

Данный подход не требует дополнительных нейросетевых моделей и выполняется быстро, поскольку преобразование Хафа работает непосредственно с бинаризованным изображением небольшого размера. Метод особенно эффективен для линейных штрихкодов, где вертикальные штрихи образуют четко выраженную доминирующую ориентацию. Для матричных кодов (QR и DataMatrix) доворот также полезен, хотя в меньшей степени, поскольку эти форматы более устойчивы к повороту благодаря встроенным ориентирующим паттернам.

5. Нормализация разрешения перед декодированием

Перед подачей в декодер ZXing выполняется еще один этап – приведение области кода к фиксированному целевому разрешению. По умолчанию используется значение порядка 700×700 пикселей, которое эмпирически показало хорошие результаты для большинства QR-кодов. При этом целевое разрешение является настраиваемым параметром и может быть задано индивидуально для каждого типа кода в зависимости от его структуры.

Логика нормализации работает в двух направлениях. Если после детекции и перспективной коррекции вырезанный фрагмент имеет избыточное разрешение (например, 2600×2600 пикселей), выполняется понижающее масштабирование – это существенно сокращает время декодирования, поскольку декодеру приходится обрабатывать значительно меньшее количество пикселей. В обратной ситуации, когда код занимает малую область кадра и его разрешение оказывается недостаточным (например, 240×240), применяется модель суперразрешения, которая восстанавливает детали и повышает четкость кода [18, 19, 20], увеличивая разрешения. Это важно, так как декодер плохо справляется с низкими разрешениями, где границы между элементами кода размываются и становятся неразличимы.

Стоит отдельно отметить, что сам факт передачи в декодер обрезанной области кода, а не полного кадра с камеры, уже дает заметный выигрыш по времени – количество обрабатываемых пикселей сокращается на порядки. В сочетании с нормализацией разрешения это позволяет удерживать время декодирования в предсказуемых рамках вне зависимости от исходного размера кадра и расстояния до кода, одновременно обеспечивая стабильно высокое качество распознавания.

Заключение

Итоговый пайплайн обработки представляет собой последовательность из нескольких этапов: сначала кадр поступает в детектор NanoDet, который локализует область кода в изображении, затем инференс выполняется через NCNN, обеспечивая высокую скорость работы на мобильных ARM-процессорах за счет нативной поддержки NEON SIMD-инструкций. По результатам детекции производится геометрическая коррекция найденной области – доворот и исправление перспективных искажений, что приводит код к нормализованному виду. Подготовленный таким образом фрагмент передается в библиотеку ZXing для финального декодирования.

Безусловно, добавление этапов детекции и перспективной коррекции увеличивает общее время обработки одного кадра по сравнению с прямым сканированием через ZXing. Однако эта задержка остается малозаметной, так как сканируются уже небольшие обрезанные участки с кодами, а не все изображение, в том числе NanoDet является очень легкой архитектурой детекции, а NCNN минимизирует накладные расходы на инференс. При этом качество распознавания возрастает значительно: коды, снятые под углом, частично перекрытые или искаженные перспективой, которые ранее не считывались, теперь успешно декодируются благодаря предварительной нормализации изображения. Таким образом, небольшая потеря в скорости с лихвой компенсируется существенным приростом надежности сканирования в реальных условиях эксплуатации.

Список литературы:

1. Zharkov A., Zagaynov I. Universal Barcode Detector via Semantic Segmentation // Proceedings of the 15th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2019). – Piscataway, NJ: IEEE Computer Society, 2019. – P. 837–843. DOI: 10.1109/ICDAR.2019.00139 EDN: ZIKKUX

2. Redmon, J. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi // Proceedings of the IEEE CVPR. – 2016. – P. 779–788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91

3. Jocher, G. Ultralytics YOLO / G. Jocher, A. Chaurasia, J. Qiu. [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/ultralytics/ultralytics (дата обращения: 12.05.2026).

4. RangiLyu. NanoDet-Plus: Super fast and lightweight anchor-free object detection model for mobile devices // GitHub repository. – 2021. [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/RangiLyu/nanodet (дата обращения: 15.05.2026).

5. ONNX Runtime developers. ONNX Runtime: cross-platform, high performance ML inferencing and training accelerator // GitHub repository. [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/microsoft/onnxruntime (дата обращения: 18.05.2026).

6. Tencent. NCNN: High-performance neural network inference computing framework optimized for mobile platforms // GitHub repository. [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/Tencent/ncnn (дата обращения: 20.05.2026).

7. Scheuermann, C. Evaluation of Barcode Decoding Performance using ZXing Library / C. Scheuermann, M. Werner, M. Kessel, C. Lenz, H. J. Maier, S. Verclas // Proceedings of the Second Workshop on Smart Mobile Applications (SmartApps'12). – 2012.

8. Tian, Z. FCOS: Fully Convolutional One-Stage Object Detection / Z. Tian, C. Shen, H. Chen, T. He // Proceedings of the IEEE/CVF ICCV. – 2019. – P. 9627–9635. DOI: 10.1109/ICCV.2019.00972

9. Li, X. Generalized Focal Loss: Learning Qualified and Distributed Bounding Boxes for Dense Object Detection / X. Li, W. Wang, L. Wu, S. Chen, X. Hu, J. Li, J. Tang, J. Yang // NeurIPS. – 2020. – Vol. 33.

10. Lin, T.-Y. Focal Loss for Dense Object Detection / T.-Y. Lin, P. Goyal, R. Girshick, K. He, P. Dollár // Proceedings of the IEEE ICCV. – 2017. – P. 2999–3007. DOI: 10.1109/ICCV.2017.324

11. Howard A. G., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D., Wang W., Weyand T., Andreetto M., Adam H. MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications // arXiv. – 2017. – Art. 1704.04861.

12. ARM Ltd. ARM NEON Intrinsics Reference // ARM Architecture Reference Manual. [Электронный ресурс]. URL: https://ext.earthtools.ca/private/rpi/arm/NEON-intrinsics.pdf (дата обращения: 20.05.2026).

13. Jiang X. MNN: A Universal and Efficient Inference Engine / X. Jiang, H. Wang, Y. Chen, Z. Wu, L. Wang, B. Zou, Y. Yang, Z. Cui, Y. Cai, T. Yu, C. Lv, Z. Wu // arXiv preprint arXiv:2002.12418. – 2020.

14. Jacob B. Quantization and Training of Neural Networks for Efficient Integer-Arithmetic-Only Inference / B. Jacob, S. Kligys, B. Chen, M. Zhu, M. Tang, A. Howard, H. Adam, D. Kalenichenko // Proceedings of the IEEE CVPR. – 2018. – P. 2704–2713. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00286

15. Lomont C. Introduction to Intel Advanced Vector Extensions / C. Lomont // Intel White Paper. – 2011.

16. Duda R. O. Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures / R. O. Duda, P. E. Hart // Communications of the ACM. – 1972. – Vol. 15, № 1. – P. 11–15. DOI: 10.1145/361237.361242

17. Hough, P. V. C. Method and means for recognizing complex patterns: пат. US3069654A США / P. V. C. Hough. – 1960.

18. Wang X. ESRGAN: Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks / X. Wang, K. Yu, S. Wu, J. Gu, Y. Liu, C. Dong, Y. Qiao, C. C. Loy // ECCV Workshops. – 2018.

19. Wang Z. Deep Learning for Image Super-Resolution: A Survey / Z. Wang, J. Chen, S. C. H. Hoi // IEEE TPAMI. – 2021. – Vol. 43, № 10. – P. 3365–3387. DOI: 10.1109/tpami.2020.2982166 EDN: AQIEMB

20. Dong C. Image Super-Resolution Using Deep Convolutional Networks / C. Dong, C. C. Loy, K. He, X. Tang // IEEE TPAMI. – 2016. – Vol. 38, № 2. – P. 295–307. DOI: 10.1109/TPAMI.2015.2439281

УДК 004.45:005.92

Кондратьев В. Ю., Сафронов Н. В.
Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар, Россия

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДСИСТЕМА КОНТРОЛЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ КЛЮЧЕВЫХ ОПЕРАЦИЙ НА ПЛАТФОРМЕ 1С:ДОКУМЕНТООБОРОТ НА ОСНОВЕ МЕТОДИКИ APDEX

Аннотация. Платформа «1С: Документооборот» активно используется в корпоративной среде, но штатные средства мониторинга не дают проактивных оповещений и не хранят аналитические данные длительное время. В работе предложены архитектура и алгоритмы подсистемы, которая интегрируется в существующую конфигурацию и опирается на международную методику оценки производительности APDEX. Детально описана модель данных – специализированные справочники и регистры сведений, механизмы автоматического выявления отклонений времени выполнения ключевых операций, накопления статистических срезов и уведомления ответственных. Апробация подтвердила, что быстродействие удаётся контролировать оперативнее, а трудозатраты на мониторинг существенно снижаются.

Ключевые слова: 1С:Документооборот, быстродействие, ключевые операции, APDEX, мониторинг производительности, автоматизация оповещения, статистический анализ, модель данных.

Введение. Рост объёмов данных и усложнение бизнес-процессов в системах на платформе «1С:Предприятие» неизбежно снижают производительность ключевых операций. Скорость обслуживания пользователей падает, страдает качество управленческих решений. Штатные средства – технологический журнал, журнал регистрации, встроенная подсистема оценки производительности APDEX в 1С:Документообороте – ориентированы на пассивный анализ post factum. Они не позволяют оперативно оповестить ответственных, когда параметры выходят за допустимые границы, и не накапливают долгосрочную агрегированную статистику для прогнозирования узких мест. Существующие подходы к мониторингу производительности [5] и требования к оформлению работ [1] учитывались при постановке задачи.

Цель работы – разработать архитектуру и алгоритмы подсистемы контроля быстродействия. Она должна дополнить существующую конфигурацию «1С:Документооборот» гибкой настройкой лимитов, автоматической проверкой отклонений, расчётом индекса APDEX и накоплением статистических срезов.

Методика APDEX как основа оценки производительности. Международный стандарт APDEX (Application Performance Index) [4]

агрегирует множество замеров времени выполнения операций в один числовой показатель. Формула:

APDEX = (Ns + Nt / 2) / N,

где N – общее количество выполнений операции за анализируемый период, Ns – число выполнений, уложившихся в целевое время T (зона удовлетворённости), Nt – число выполнений с временем от T до 4T (зона допустимого замедления). Значение индекса лежит в диапазоне от 0 до 1. Пороговым считается 0,85; падение ниже этого уровня сигнализирует о серьёзной деградации производительности. Встроенный отчёт «1С:Документооборота» показывает APDEX по нескольким операциям, но не реагирует на его снижение автоматически и не сохраняет исторические срезы для анализа динамики.

Архитектура и модель данных подсистемы. При разработке подсистемы использовались типовые приемы, описанные в практическом пособии разработчика 1С [3]. Подсистема представляет собой совокупность объектов метаданных, добавляемых в типовую конфигурацию «1С:Документооборот» без изменения её структуры. Модель данных включает специализированные справочники и регистры сведений.

Справочник «Настройки рассылки превышения показателей» агрегирует все параметры контроля. В шапке – реквизиты «Используется», «Шаблон текста оповещения» и «Периодичность». Три табличные части: «Список показателей» (связь с ключевой операцией, целевое время, лимит, процент отклонения и время выборки), «Адресаты уведомлений» (пользователи и их email) и «Замеры по пользователям» (ограничивает круг анализируемых сотрудников; если не заполнена, замеры собираются по всем).

Для хранения оперативных данных задействован регистр сведений «Замеры времени». Его доработали: строковое поле «Пользователь» заменили ссылкой на справочник «Пользователи», что дало однозначную идентификацию. Вспомогательный регистр «Журнал выполнения рассылки» фиксирует дату и время последней проверки для каждой настройки, помогая соблюдать заданную периодичность.

Очередь уведомлений хранится в регистре «Технические уведомления системы». Его ресурсы: получатель, адрес отправки, способ уведомления (email), текст сообщения, статус (отправлено/не отправлено), дата и время отправки. Такая структура разделяет формирование сообщений и их непосредственную рассылку, позволяя делать повторные попытки при сбоях.

Для накопления долгосрочной статистики служит регистр «Статистика по ключевым операциям». Измерения: ключевая операция, дата начала и дата окончания периода. Ресурсы: минимальное, максимальное и среднее время выполнения, количество вызовов и значение APDEX. Периодичность сохранения срезов задаётся индивидуально для каждой операции через

регистр «Настройка хранения статистики» и форму рабочего места администратора. Взаимосвязи между объектами подсистемы сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Взаимодействие объектов подсистемы

Объект-источник	Тип связи	Объект-приемник
Регистр сведений «Замеры времени»	Источник данных	Регламентное задание «Рассылка превышения показателей»
Регистр сведений «Замеры времени»	Источник данных	Регламентное задание «Запись статистики по ключевым операциям»
Регламентное задание «Рассылка превышения показателей»	Формирует очередь	Регистр «Технические уведомления системы»
Регламентное задание «Рассылка превышения показателей»	Фиксирует факт проверки	Регистр «Журнал выполнения рассылки»
Регламентное задание «Запись статистики по ключевым операциям»	Сохраняет срезы	Регистр «Статистика по ключевым операциям»

Алгоритмы контроля и накопления данных. Алгоритмы спроектированы на основе методов формализации требований, рассмотренных в [7]. Регламентное задание «Рассылка превышения показателей» – ключевой механизм подсистемы. Алгоритм работает так.

1. Выбираются все активные настройки из справочника «Настройки рассылки».

2. Для каждой настройки проверяется, превышает ли разница между текущей датой и датой последней проверки (из регистра «Журнал выполнения рассылки») заданную периодичность.

3. Если условие выполнено, идёт запрос к регистру «Замеры времени» за интервал «текущая дата – время выборки». Для каждой ключевой операции подсчитывается общее количество замеров и количество замеров, превысивших установленный лимит.

4. Рассчитывается процент превышений. Если он выше критического значения, указанного в настройке, операция попадает в список нарушений.

5. По шаблону оповещения формируется текст сообщения. В нём перечисляются проблемные операции с указанием целевого времени, лимита и фактического процента отклонений.

6. Для каждого адресата создаётся запись в регистре «Технические уведомления системы» с текстом сообщения и статусом «не отправлено».

7. Фиксируется новая дата выполнения проверки.

Второй важный алгоритм реализует регламентное задание «Запись статистики по ключевым операциям». Он решает проблему постепенного удаления детальных замеров из оперативного регистра. Задание срабатывает раз в сутки и для каждой операции.

1. Проверяет, прошло ли с даты последнего среза количество дней, равное заданной периодичности.

2. Если прошло – запрашивает из регистра «Замеры времени» данные за период от даты последнего среза до текущей даты.

3. Вычисляет минимальное, максимальное и среднее время выполнения, количество вызовов, а также компоненты для расчёта APDEX (N_T и N_T_4T).

4. Вычисляет значение APDEX по приведённой выше формуле и сохраняет все агрегированные данные одной записью в регистр «Статистика по ключевым операциям», проставляя даты начала и окончания периода.

Такой подход даёт компактное и постоянное хранение исторических данных, позволяя анализировать динамику производительности за несколько лет без обращения к детальным замерам.

Результаты апробации и сравнительный анализ. Экспериментальная эксплуатация подсистемы в организации, активно использующей «1С:Документооборот», принесла несколько результатов.

Время реакции на инциденты производительности сократилось в несколько раз. Раньше информация о «тормозах» поступала от пользователей с задержкой. Теперь уведомление приходит в течение ближайшего сеанса регламентного задания после возникновения отклонений.

Накопление статистических срезов позволило перейти от реактивного к проактивному управлению [6]. Для операции «Создание документа» индекс APDEX за год оставался стабильным – 0,92–0,94. Операция «Запуск процесса» показала слабую тенденцию к снижению: с 0,88 до 0,85. Наиболее показательной оказалась операция «Формирование отчёта»: в апреле её APDEX резко упал до 0,72. Именно этот провал, зафиксированный подсистемой, позволил быстро локализовать и устранить проблему – до того, как на неё начали массово жаловаться пользователи.

Трудозатраты на мониторинг быстродействия снизились примерно на 70% по сравнению с ручным сбором и анализом данных. Сравнительные цифры приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение трудозатрат на мониторинг (часов в месяц)

Вид работы	**Ручной мониторинг**	**Автоматизированный мониторинг**
Сбор замеров времени	20	6
Анализ отклонений	35	4
Подготовка отчётов	30	8
Итого	85	18

Сравнение предложенного решения с другими подходами к контролю производительности (таблица 3) показывает, что разработанная подсистема обеспечивает высокий уровень автоматизации по всем критериям, в отличие от использования только технологического журнала или журнала регистрации.

Таблица 3 – Сравнительный анализ средств контроля производительности 1С

Критерий	**Технологический журнал**	**Журнал регистрации**	**Встроенная подсистема APDEX**	**Разработанная подсистема**
Автоматический сбор замеров	Да	Частично	Да	Да
Расчёт APDEX	Нет	Нет	Да	Да
Настройка лимитов	Нет	Нет	Нет	Да
Автоматическое оповещение	Нет	Нет	Нет	Да
Долгосрочное хранение статистики	Нет	Частично	Нет	Да
Анализ трендов	Нет	Нет	Нет	Да

Годовой экономический эффект, рассчитанный по методике оценки эффективности программных продуктов [2], составил около 23 тыс. рублей при капитальных вложениях порядка 101 тыс. рублей. Срок окупаемости – примерно 2,5 года.

Заключение. Разработанная подсистема показала практическую полезность как инструмент непрерывного контроля производительности «1С:Документооборота». Она дополняет встроенные механизмы замера времени автоматическим оповещением и долгосрочным статистическим анализом. Предложенные архитектурные решения можно тиражировать в других организациях, эксплуатирующих типовые конфигурации 1С. Перспективные направления – интеграция с корпоративными системами мониторинга ИТ-инфраструктуры, мобильные уведомления, расширение перечня контролируемых операций.

Список литературы:

1. ГОСТ Р 7.05-2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. М.: Стандартинформ, 2008. – 20 с.

2. Бочаров Е. П. Интегрированные корпоративные информационный системы: Принципы построения. Лабораторный практикум на базе системы «Галактика»: Учеб. пособие. - Москва: Финансы и статистика, 2005 (Великолук. гор. тип.). – 287 с.

3. Радченко М. Г., Хрусталева Е. Ю. 1С: Предприятие 8.3. Практическое пособие разработчика. Примеры и типовые приемы. – М.: 1С-Паблишинг, 2013. – 963 с. ISBN 978-5-9677-2632-3

4. Программная инженерия = Software Engineering = Programmnaya Ingeneria: теоретический и прикладной научно-технический журнал. – М.: Новые технологии, 2021. – Т. 12, № 8. – С. 395–440.

5. 1С: Корпоративный инструментальный пакет 8. Центр управления производительностью: инструмент мониторинга и анализа производительности информационных систем на платформе «1С:Предприятие 8». – URL: https://consulting.1c.ru/technologies/kip (дата обращения: 08.06.2026).

6. Clement K. C., Fiser R. T., Fiser W. P., Chipman C. W., Taylor B. J., Heulitt M. J., Moss M., Fasules J. W., Faulkner S. C., Imamura M., Fontenot E. E., Jaquiss R. D. Single-Institution Experience with Interhospital Extracorporeal Membrane Oxygenation Transport: A Descriptive Study // Pediatric Critical Care Medicine. – 2010. – Vol. 11, No. 4. – P. 509–513. DOI: 10.1097/PCC.0b013e3181c515ca

7. Коберн А. Современные методы описания функциональных требований к системам. М.: Лори, 2002. – 263 с.

УДК 631.316:004.383

Хисамутдинов А. И., Имангулов В. Х., Фархутдинов И. М.
Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ РАБОТЫ КУЛЬТИВАТОРА С ПРУЖИННЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ НА БАЗЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ARDUINO

Аннотация. В статье представлена методика измерения твёрдости почвы с использованием деформатора на базе микроконтроллера Arduino Uno. Измерительная система включает тензодатчик, подключённый через модуль HX711, жидкокристаллический дисплей для локального отображения данных, модуль Bluetooth для передачи информации на внешнее устройство и MOSFET-транзистор для управления вибромотором, создающий принудительные колебания рабочего органа культиватора. Для получения данных о сопротивлении почвы разработана стойка с наконечником в виде цилиндрического деформатора диаметром 30 мм и шириной 6 мм. Полученные данные о твёрдости почвы будут использованы для энергетической и качественной оценки рабочих органов почвообрабатывающих машин, а также для обоснования их конструктивно-технологических параметров.

Ключевые слова: твёрдость почвы, тензодатчик, Arduino Uno, HX711, вибромотор, MOSFET, Bluetooth, ЖК-дисплей, адаптивный рабочий орган, деформатор.

Введение

Энергетические затраты на обработку почвы являются одним из важных показателей, определяющих себестоимость производимой продукции [1]. На тяговое сопротивление орудия влияют такие физико- механические свойства как плотность почвы, твердость и влажность. Плотность и твёрдость почвы изменяются как по длине гона, так и по ширине поля, особенно в зоне колеи трактора, где уплотнение может превышать допустимые нормы. Это приводит к неравномерной глубине обработки и снижению качества агротехнической операции [2, 3]. В связи с этим мониторинг плотности и твердости почвы для определения типа орудия и режимов ее работы является важной задачей.

Современные цифровые технологии позволяют создавать мобильные и точные системы для оперативного измерения механических свойств почвы. В работах [4, 5] рассматриваются решения на основе микроконтроллеров для мониторинга параметров аграрной среды. Однако вопрос интеграции измерения твёрдости с имитацией адаптивного поведения рабочего органа остаётся недостаточно освещённым.

В связи с этим разработка методики измерения твёрдости почвы с возможностью автоматического реагирования на изменение сопротивления

является актуальной задачей при проектировании адаптивных почвообрабатывающих машин.

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка методики измерения твёрдости почвы на базе микроконтроллера Arduino Uno и создание прототипа системы, способной не только регистрировать механические свойства почвы, но и имитировать адаптивный режим работы пружинного рабочего органа культиватора.

Задачи исследования:

1. разработать конструкцию деформатора с рычажным механизмом для измерения усилия внедрения;
2. создать программно-аппаратную систему на базе Arduino Uno для обработки сигнала с тензодатчика;
3. обеспечить визуализацию и передачу данных о твёрдости почвы;
4. реализовать автоматическое управление вибромотором при превышении порогового значения сопротивления.

Материалы и методы

Для измерения твёрдости почвы разработана цифровая система, включающая следующие компоненты.

Arduino Uno - центральный контроллер.

Тензодатчик с модулем HX711 - для измерения усилия при внедрении деформатора в почву.

ЖК - дисплей 2004A (I2C) - для локального отображения данных.

Bluetooth - модуль (HC-05/06) - для передачи данных на ноутбук или смартфон.

MOSFET - транзистор (IRLZ44N) - для управления вибромотором 12 В от 5 В сигнала Arduino.

Вибромотор 12 В - установлен на стойке культиватора, имитирует вибрационный режим работы рабочего органа.

Конструкция измерительного узла

Для получения данных о сопротивлении почвы вместо стандартной лапы была установлена стойка с наконечником в виде цилиндрического деформатора. Деформатор выполнен в форме цилиндра диаметром 30 мм и шириной 6 мм, что соответствует типовым параметрам контактного элемента при измерении твёрдости по методике внедрения.

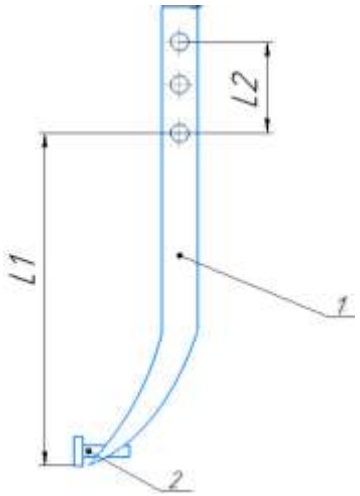


Рисунок 1 – Конструкция измерительного узла
1 – стойка (рычаг), 2 – деформатор

Усилие от деформатора передаётся через рычажный механизм (L1 = 455 мм, L2 = 145 мм) на тензодатчик, установленный на коротком плече. Такое решение позволяет снизить нагрузку на тензодатчик и увеличить точность измерений.

Принцип работы системы

При внедрении деформатора в почву усилие передаётся через рычажный механизм на тензодатчик. Модуль HX711 усиливает сигнал и передаёт его на Arduino. После обработки данные отображаются на ЖК-дисплее и могут передаваться по Bluetooth на внешнее устройство.

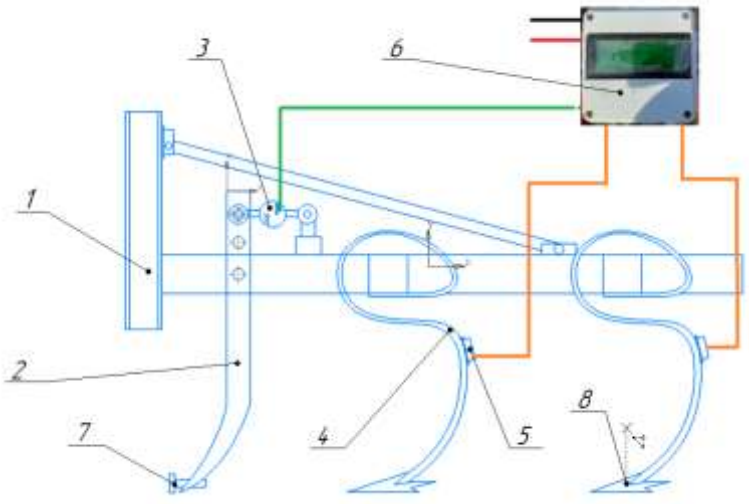


Рисунок 2 – Общая схема системы измерения твёрдости почвы
1 – рама; 2 – стойка-рычаг; 3 – тензодатчик; 4 – S – образная стойка; 5 – вибромотор; 6 – электронный блок управления; 7 – цилиндрический деформатор; 8 – лапа S – образной стойки

Система учитывает коэффициент передачи рычага:

$$\text{level_ratio}_1 = \frac{L2}{L1} = \frac{145}{455} \approx 0{,}3187$$

Рассчитывается масса, сила (в Ньютонах) и твёрдость почвы:

$P = \frac{F}{S}$, где S = 0,0907 см^2 - площадь деформатора

Площадь основания деформатора рассчитана по формуле $S = \pi \cdot r^2$, где r = 1.5 см.

При превышении силы сопротивления 50Н (настраиваемое значение) включается вибромотор через MOSFET, который передает колебания на рабочий орган культиватора.

Программная реализация

Программа на Arduino выполняет:

1. усреднение 10 измерений для повышения точности;
2. автоматическое обнуление при старте и ручную тарировку по кнопке; расчёт твёрдости и силы;
3. управление вибромотором по порогу;
4. вывод данных на дисплей и возможность передачи по Bluetooth.

Результаты и обсуждение

Разработанная система позволяет следующее.

Оперативно измерять твёрдость почвы в диапазоне 0–5 кгс/см².

Визуализировать данные на месте и передавать их на ноутбук в реальном времени.

Автоматически активировать вибрационный режим при увеличении сопротивления.

Полученные данные могут быть использованы для:

1. энергетической оценки процесса обработки;
2. обоснования параметров жёсткости и амплитуды колебаний адаптивного рабочего органа;
3. создания систем автоматического управления глубиной и режимом работы культиватора.

Заключение

Разработанная методика измерения твёрдости почвы на базе Arduino Uno является эффективным инструментом для исследования механических свойств почвы. Интеграция измерения и реакции системы (вибромотор) позволяет моделировать поведение адаптивных рабочих органов, что открывает возможности для создания интеллектуальных почвообрабатывающих машин с автоматической подстройкой под условия поля.

Список литературы:

1. Организация и технология механизированных работ в растениеводстве: учеб. пособие / Н.И. Верещагин, А.Г. Левшин, А.Н. Скороходов и др. – 7-е изд. Стер. – Москва: Издательский центр «Академия», 2013. – 416 с. ISBN: 978-5-7695-9632-2 EDN: MWBBVZ

2. Кудзаев А. Б. Сравнение различных форм лезвия поступательно движущихся почвообрабатывающих рабочих органов // Тракторы и сельхозмашины. – 2023. – Т. 90, № 4. – С. 337–349.

3. Маратканов А.А. Амплитудно-частотная характеристика гибкой трубчатой стойки культиватора / А.А. Маратканов, Н.Н. Устинов, Н.И. Смолин // Вестник Курганской ГСХА. – 2013. – № 4(8). – С. 88–90.

4. Устинов Н.Н. Результаты определения крошения почвы при работе вибрационного культиватора / Н.Н. Устинов, А.С. Мартыненко, А.А. Маратканов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2021. – № 5(91). – С. 85–88. EDN: ZCXJBY

5. Федоров С. Е., Жалнин А. А. Способы изменения жесткости упругих S-образных стоек культиваторов // Научное обозрение. Международный научно-практический журнал. – 2020. – № 2. – С. 2. EDN: BJZEQS

6. Мазитов Н. К. Машины почвоводоохранного земледелия. – М.: Россельхозиздат, 1987. – 94, [3] с. – (Ученые и практики – Продовольственной программе).

УДК 629.423:621.333

Самаринов Л. А.
Научный руководитель: Волохов Г. М., д-р техн. наук
Российский университет транспорта, Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ ПРИ АСИНХРОННОЙ ТЯГЕ СКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА

Аннотация. Рассматривается учет условий сцепления колес с рельсами при управлении асинхронным тяговым приводом скоростного электропоезда. Показано, что одних критериев по моменту, быстродействию и энергетической эффективности недостаточно, поэтому управление следует формулировать как многокритериальную задачу с учетом ограничений по сцеплению и разрабатывать алгоритмы, обеспечивающие устойчивую реализацию тяги без избыточного скольжения.

Ключевые слова: асинхронный тяговый привод; скоростной электропоезд; коэффициент сцепления; контакт колесо-рельс; поосное регулирование тяги.

В современных условиях развития железнодорожного транспорта возрастают требования к эффективности работы электрооборудования, плавности хода скоростного электроподвижного состава и его надежности [1]. Одним из наиболее распространенных направлений совершенствования тяговых систем является применение асинхронных тяговых двигателей, питаемых от тягового преобразователя, включающего в себя автономный инвертор напряжения. Асинхронные тяговые двигатели отличаются сравнительно простой конструкцией, более высокой мощностью на ось при сохранении допустимой нагрузки на путь и хорошими возможностями регулирования момента и скорости в широком диапазоне режимов [2, 4].

Вместе с тем эффективность асинхронной тяги определяется не только характеристиками самого двигателя и качеством его системы управления. Для скоростного электропоезда принципиальное значение имеет способность реализовать требуемую силу тяги без перехода колесной пары в режим проскальзывания. Иными словами, задача управления тягой неизбежно связана с условиями сцепления колеса с рельсом, которые в реальной эксплуатации остаются переменными и зависят от множества внешних факторов [3].

Проблема сцепления особенно заметна в переходных режимах, когда требуется быстрое нарастание или перераспределение тягового момента. При недостаточном запасе сцепления даже технически исправный и хорошо настроенный асинхронный привод может сформировать такой момент, который уже не будет реализован на контакте колеса и рельса. В этом случае часть тягового усилия теряется, а колесная пара переходит в режим

повышенного скольжения, что ухудшает тяговые свойства, увеличивает износ и отрицательно влияет на устойчивость движения [5, 6, 7].

Поэтому в задачах управления асинхронным тяговым приводом для скоростного электропоезда недостаточно рассматривать только внутренние электрические критерии. Традиционно при настройке таких систем оценивают точность регулирования момента, быстродействие, устойчивость переходных процессов, ограничение токов и снижение потерь мощности. Однако для реального тягового режима этого недостаточно, поскольку величина допустимого момента определяется еще и внешним ограничением по сцеплению [3, 5].

С практической точки зрения это означает, что система управления тяговым двигателем должна работать не просто по заданию на момент или скорость, а с учетом того, насколько данный момент может быть реализован колесной парой в текущих условиях движения. Коэффициент сцепления не является постоянной величиной. На него влияют состояние рельсовой поверхности, влажность, загрязнение, скорость движения, перераспределение вертикальных нагрузок и особенности работы конкретной колесной пары. По этой причине допустимая сила тяги меняется в процессе движения, а задача управления приобретает выраженный многокритериальный характер [5, 6].

Одним из ключевых критериев в системе управления асинхронным тяговым приводом является обеспечение требуемого электромагнитного момента. Современные методы регулирования, включая векторное управление и прямое управление моментом, позволяют достаточно быстро и точно формировать необходимый крутящий момент двигателя. Это особенно важно для скоростного электропоезда, где от тягового привода требуется плавный разгон, устойчивое поддержание режима движения и корректная работа в переходных процессах [3, 4].

Однако сам по себе критерий быстрого и точного формирования момента нельзя считать достаточным. Если нарастание момента оказывается слишком интенсивным, то тяговое усилие на ободе колеса может превысить границу устойчивого сцепления. В такой ситуации двигатель с точки зрения электротехники работает корректно, но с точки зрения взаимодействия экипажа и пути режим становится неблагоприятным. Следовательно, критерий быстродействия должен рассматриваться совместно с ограничением темпа изменения момента и с контролем скольжения колесных пар [3, 5].

Не менее важным является энергетический критерий. Для скоростного электропоезда существенное значение имеют снижение потерь энергии и рациональное использование мощности тягового оборудования. Асинхронный привод позволяет реализовывать экономичные режимы работы, а выбор оптимальных параметров управления может снижать тепловую нагрузку на двигатель и улучшать общую эффективность системы. Тем не

менее энергетически выгодный режим не всегда совпадает с режимом, наиболее благоприятным по условиям сцепления. На участках с пониженным коэффициентом сцепления приоритет должен смещаться в сторону устойчивой реализации тяги, даже если это приводит к некоторому снижению энергетической эффективности [3].

Еще один важный критерий связан с равномерностью использования тяговых возможностей по осям. Для многодвигательного электропоезда не все колесные пары находятся в одинаковых условиях. Различия в нагрузке на оси, локальные особенности контакта колес с рельсом и динамические процессы в экипаже приводят к тому, что одна колесная пара может раньше приблизиться к границе сцепления, чем остальные. В связи с этим управление тягой целесообразно строить не только по общему заданию для всего состава, но и с учетом состояния отдельных осей. Такой подход лежит в основе поосного регулирования и перераспределения силы тяги [8].

Поосное регулирование представляет интерес именно потому, что позволяет уменьшать момент на той колесной паре, у которой появляются признаки избыточного скольжения, не снижая излишне тягу на остальных осях. Это особенно ценно для скоростного электропоезда, где требуется сохранить устойчивый разгон и одновременно исключить развитие боксования. Экспериментальные и расчетные исследования показывают, что работа на пределе по сцеплению требует достаточно точного выбора диапазона допустимого относительного скольжения: его превышение уже не дает прироста тяговых свойств, но ускоряет износ колес и ухудшает режим взаимодействия с рельсом [7, 8].

Сложность состоит в том, что коэффициент сцепления не измеряется непосредственно в процессе движения. Поэтому в системе управления используют косвенные признаки, по которым можно судить о приближении к неблагоприятному режиму. К таким признакам относят изменение скорости отдельных колесных пар, относительное скольжение, ускорения, особенности поведения тока и момента двигателя. Фактически система управления должна не только формировать тягу, но и непрерывно оценивать запас по сцеплению по наблюдаемым параметрам [5, 7].

На этой основе можно выделить несколько основных подходов к учету сцепления в управлении асинхронной тягой скоростного электропоезда.

Первый подход связан с ограничением максимального тягового момента по условию сцепления. Его достоинство заключается в относительной простоте: система заранее не позволяет выходить за область, в которой вероятность проскальзывания резко возрастает. Недостатком такого решения является необходимость выбора достаточно консервативных ограничений, что не всегда позволяет использовать тяговые возможности привода полностью [5, 6].

Второй подход основан на адаптивной коррекции момента по текущему состоянию колесной пары. В этом случае система управления изменяет задание по моменту в зависимости от признаков скольжения и переходных процессов в тяговом приводе. Такой вариант потенциально обеспечивает более полное использование сцепления, поскольку управление перестает быть жестко фиксированным и подстраивается под реальные условия движения. Вместе с тем он предъявляет более высокие требования к наблюдателям состояния, алгоритмам обработки сигналов и устойчивости самой системы регулирования [3, 7].

Третий подход связан с объединением электрических и механических критериев в рамках единой постановки задачи. В этом случае управление рассматривается как многокритериальная проблема, где одновременно учитываются точность регулирования момента, быстродействие, потери энергии, тепловое состояние двигателя и ограничение по сцеплению. Для скоростного электропоезда такой подход представляется наиболее содержательным, поскольку позволяет перейти от разрозненных частных настроек к более целостному пониманию работы тягового привода в реальных условиях эксплуатации [4, 5].

Таким образом, общая проблема учета сцепления в критериях управления асинхронным двигателем заключается в необходимости согласовать внутренние требования электропривода с внешними ограничениями системы «колесо–рельс». Если ориентироваться только на электрические показатели, можно получить режим, который формально оптимален для двигателя, но не обеспечивает устойчивой реализации силы тяги. Если же учитывать только сцепление, то возможно неоправданное ограничение тяговых возможностей и снижение эффективности работы электропоезда. Следовательно, задача должна решаться на основе компромисса между этими группами требований [4, 5].

Для скоростного электропоезда это особенно важно, поскольку при росте скорости возрастает чувствительность системы к качеству управления тягой, плавности переходных процессов и перераспределению нагрузок между колесными парами. По этой причине дальнейшие исследования в данной области целесообразно связывать с разработкой моделей, в которых асинхронный тяговый привод, механическая часть экипажа и условия сцепления рассматриваются как единая взаимосвязанная система. Такой подход позволит более обоснованно выбирать критерии регулирования момента и формировать алгоритмы, обеспечивающие устойчивую тягу без избыточного скольжения [4, 5].

В заключение следует отметить, что задача обеспечения сцепления при асинхронной тяге скоростного электропоезда не сводится к отдельной функции противобуксовочной защиты. Речь идет о более широкой проблеме

согласования управления тяговым приводом с реальными условиями взаимодействия колеса и рельса. Именно поэтому при дальнейшем развитии систем управления скоростного ЭПС необходимо уделять внимание не только точности формирования момента, но и критериям его реализации в зоне допустимого сцепления [4, 5].

Список литературы:

1. ГОСТ Р 55434–2013. Электропоезда. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2014.

2. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учеб. пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта: в 2 т. Т. 1 / И. П. Киселев [и др.]; под ред. И. П. Киселева; допущено Федеральным агентством железнодорожного транспорта. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2020. – 428 с. ISBN 978-5-907206-40-3. EDN: MPVRST

3. Титова Т. С., Колпахчьян П. Г., Володина А. С. Система регулирования асинхронного тягового двигателя скоростного поезда // Бюллетень результатов научных исследований. – 2026. – № 1. – С. 128–141.

4. Розенфельд В. И., Исаев И. П., Сидоров Н. Н. Теория электрической тяги. – 2 е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.

5. Лужнов Ю. М. Нанотрибология сцепления колёс с рельсами. – М.: Интекст, 2009. – 176 с. ISBN: 978-5-89277-091-0 EDN: OWWCLW

6. Самме Г. В. Фрикционное взаимодействие колёсных пар локомотива с рельсами. Теория и практика сцепления локомотива. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. – 104 с. EDN: VETOCF

7. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicle running on adhesion limit // Wear. – 2005. – Vol. 258. – № 7-8. – P. 992–1000. DOI: 10.1016/j.wear.2004.03.046 EDN: KHYHTH

8. Шилин Н. Д., Прокофьев С. Н. Поосное перераспределение силы тяги для электровозов с асинхронными тяговыми электродвигателями // Вестник ВНИИЖТ. – 2022. – Т. 81. – № 2. – С. 148–156. DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-148-156 EDN: NPNNOE

УДК 004.932:629.05

Зиедан Шади Ибрагим Эльсаид Ахмед
Научный руководитель: Тутубалин П. И., канд. техн. наук, доцент
Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ТРЕКИНГА МАРШРУТОВ НА ОСНОВЕ OPENVINS

Аннотация. Актуальность исследования определяется потребностью в автономном восстановлении траектории носителя по данным бортовых датчиков в задачах мобильной робототехники, дополненной реальности и навигации в помещениях, где спутниковые сигналы недоступны или имеют недостаточную точность. Несмотря на широкое распространение смартфонов, оснащённых камерой и инерциальным измерительным модулем, готовых решений для запуска ресурсоёмкого алгоритма визуально-инерциальной одометрии непосредственно на мобильном устройстве без внешней инфраструктуры практически нет. **Цель** – разработка и реализация Android-приложения, выполняющего оценку шестистепенной позы носителя в реальном времени на базе библиотеки OpenVINS, с акцентом на программную архитектуру и принятые инженерные решения. **Методика.** Вычислительное ядро OpenVINS (фильтр MSCKF) собирается посредством Android NDK и интегрируется в приложение через JNI; видеоданные захватываются через Camera2 API, инерциальные – через SensorManager с аппаратными метками времени. Применена многопоточная схема «производитель–потребитель» с отбраковкой устаревших кадров; калибровка камеры и IMU выполнялась по методологии Kalibr. **Результаты.** На смартфоне Samsung Galaxy S24 достигнута работа в режиме, близком к реальному времени: средняя задержка обработки кадра составила 25–35 мс, ошибка замыкания контура при обходе коридора длиной около 50 м – 0,35–0,65 м (0,7–1,3%). **Выводы.** Разработанная архитектура обеспечивает эффективное выполнение алгоритма MSCKF на Android-устройстве; основные ограничения – быстрые вращения, слабое освещение и тепловое дросселирование SoC при длительной работе.

Ключевые слова: визуально-инерциальная одометрия; OpenVINS; Android NDK; MSCKF; Camera2 API; калибровка камеры и IMU; автономная навигация; трекинг маршрута.

1. Введение

Автономное восстановление траектории движения носителя по данным бортовых датчиков востребовано в задачах робототехники, дополненной реальности и навигации в условиях отсутствия или низкой точности спутниковых координат – в частности, в помещениях. Визуально-инерциальная одометрия (VIO) совмещает изображения с показаниями инерциальных модулей и позволяет получать шестистепенную позу носителя с высокой частотой обновления без какой-либо внешней инфраструктуры.

Современные смартфоны оснащены качественными камерами и MEMS-датчиками, что делает их перспективной аппаратной платформой для VIO. Вместе с тем существующие реализации алгоритмов визуально-инерциальной одометрии ориентированы на вычислительные среды класса ПК с операционной системой ROS и не рассчитаны на ресурсные ограничения мобильных устройств: ограниченный тепловой бюджет, отсутствие ROS, особенности жизненного цикла приложения Android и специфика согласования временных шкал камеры и IMU.

Объект исследования – программная система, реализующая визуально-инерциальную одометрию на смартфоне под управлением Android на основе библиотеки OpenVINS. Цель работы – описать разработку и реализацию такого приложения с акцентом на архитектуру программного обеспечения и принятые инженерные решения. Научная новизна заключается в разработке и верификации архитектуры ПО, позволяющей эффективно выполнять ресурсоёмкий алгоритм MSCKF на Android-устройствах, с экспериментально подтверждёнными показателями производительности и точности.

2. Обзор литературы

Алгоритм MSCKF (Multi-State Constraint Kalman Filter) впервые предложен в работе [1]: ключевая идея – маргинализация координат визуальных ориентиров через ограничения наблюдаемости без явного хранения их в векторе состояния. В работе [2] показано, что применение оценок Якобианов по первому приближению (FEJ) существенно улучшает согласованность ковариации фильтра на длинных траекториях. Открытая исследовательская платформа OpenVINS [3] реализует фильтр MSCKF с поддержкой FEJ, скользящим окном клонов поз и трекингом признаков на базе KLT; она широко применяется для оценки новых алгоритмов VIO на эталонных наборах данных, включая EuRoC [4].

Параллельно развиваются оптимизационные методы VIO. В VINS-Mono [5] используется нелинейная оптимизация в скользящем окне с предынтеграцией IMU, что обеспечивает высокую точность ценой бóльших вычислительных затрат. ORB-SLAM3 [6] реализует полноценную SLAM-систему с замыканием контуров, однако требует значительных вычислительных ресурсов. Для задач мобильной навигации без внешнего эталона и с жёсткими ограничениями на время отклика фильтрационный подход MSCKF предпочтителен.

Точная калибровка камеры и IMU является необходимым условием работы VIO. Инструментарий Kalibr [7] позволяет совместно откалибровать экстринсику, временной сдвиг и шумовые характеристики IMU по последовательностям, записанным непосредственно на устройстве.

Таким образом, существующие реализации либо ориентированы на ПК и ROS, либо не предоставляют открытой документированной архитектуры для

запуска на Android. Настоящая работа заполняет этот пробел, описывая полную программную цепочку от захвата данных до оценки траектории и её визуализации.

3. Постановка задачи

Требуется построить программную систему, которая на одном мобильном устройстве непрерывно принимает видеокадры и инерциальные измерения, выполняет оценку состояния фильтра OpenVINS (положение и ориентация в выбранной глобальной системе координат) и предоставляет пользователю визуализацию траектории и возможность записи данных для офлайн-калибровки.

Входной визуальный канал – последовательность кадров с камеры устройства в формате YUV, получаемых через Camera2 API с частотой 30–60 кадр/с. **Инерциальный канал** – показания акселерометра и гироскопа через SensorManager с аппаратными метками времени в шкале «время после загрузки», согласованной с временными метками кадров Camera2. Разрешение HIGH_SAMPLING_RATE_SENSORS необходимо для получения высокочастотных данных ИИМ на современных версиях Android.

Выходные данные – оценка шестистепенной позы $T = (R, p) \in SE(3)$ и история траектории для отображения на экране.

Ограничения платформы: тепловой бюджет и число ядер смартфона требуют ограничения параллелизма OpenCV (num_opencv_threads: 1); отсутствие ROS на устройстве означает, что все вызовы к OpenVINS выполняются из нативного модуля через JNI; для упрощения сборки под NDK отключены динамическая инициализация с Ceres Solver (init_dyn_use: false) и трекер ArUco (use_aruco: false).

4. Описание исследования

4.1 Архитектура системы

Архитектура включает четыре уровня: аппаратные датчики, компоненты Kotlin/Android, JNI-мост (native-lib.cpp) и фоновый поток C++, содержащий объект VioManager. Основные компоненты приложения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные компоненты приложения

Компонент	Назначение
Camera2ResView	Захват видео через Camera2, конвертация YUV→RGB (cv::Mat), передача кадра в нативную очередь измерений
MainActivity	Управление разрешениями, регистрация слушателей ИИМ, WakeLock, извлечение YAML-конфигурации в filesDir
Trajectory3DView	Прозрачный GLSurfaceView (OpenGL ES 2.0) с визуализацией траектории поверх превью камеры

Компонент	Назначение
MapActivity	Отображение траектории на карте Osmdroid/OpenStreetMap с привязкой локальных координат к геодезическим

Поток данных: инерциальные измерения поступают напрямую в VioManager::feed_measurement_imu; кадры после временной синхронизации – в feed_measurement_camera. JNI-функции getCurrentPoseJNI и getTrajectoryDataJNI возвращают текущую позу и буфер траектории для отрисовки.

4.2 Интеграция OpenVINS и калибровка

Проект собирается в Android Studio с использованием CMake ≥ 3.18.1. В CMakeLists.txt перечислены исходные файлы модулей ov_core, ov_init, ov_msckf; флаги оптимизации -O3, предсобранные OpenCV, Boost, Eigen3; для ARM64 включён NEON. Макрос ROS_AVAILABLE=0 отключает ROS-специфичный код.

При первом запуске метод extractConfigAssets копирует файлы *.yaml из assets/config/ в filesDir/config/. Существующие файлы не перезаписываются, что позволяет сохранять правки между перезапусками. Калибровка камеры и IMU выполнялась по методологии Kalibr с записью наборов данных непосредственно с телефона. Параметры калибровки для Samsung Galaxy S24 (разрешение 640×480, модель pinhole + radtan) приведены в таблице 2.

Параметры оценщика: use_fej: true, max_clones: 11, max_slam: 50, max_msckf_in_update: 40, use_klt: true, num_pts: 200, track_frequency: 31 Гц, histogram_method: CLAHE, num_opencv_threads: 1.

Таблица 2 – Параметры калибровки камеры и IMU (Samsung Galaxy S24)

Параметр	Значение
Фокусные расстояния f_x, f_y	478,71; 478,02
Главная точка c_x, c_y	325,13; 230,93
Коэффициенты дисторсии radtan	0,04132; −0,03505; −0,00112; 0,00221
Временной сдвиг камера–IMU	≈ 18,78 мс
Плотность шума гироскопа	$1{,}70 \cdot 10^{-4}$ рад/с/√Гц
Плотность шума акселерометра	$2{,}0 \cdot 10^{-3}$ м/с²/√Гц

4.3 Ключевые оптимизации реализации

Схема «производитель–потребитель». Кадры из Camera2 помещаются в std::deque под мьютексом, отдельный processing_worker_thread извлекает их и вызывает feed_measurement_camera только после накопления достаточного

числа инерциальных измерений. Это исключает блокировку потока захвата при длительной обработке кадра.

Отбраковка устаревших кадров. Если возраст кадра в очереди превышает порог MAX_CAMERA_AGE_SECONDS = 0,5 с, кадр отбрасывается. Такая политика предотвращает накопление задержки при тепловом дросселировании и удерживает фильтр в режиме, близком к реальному времени.

Согласование временных шкал. Метки времени датчиков (SensorEvent.timestamp) согласуются с временными метками кадров Camera2 через общую аппаратную шкалу CLOCK_BOOTTIME, что уменьшает ошибку синхронизации камера–IMU. Остаточный сдвиг оценивается фильтром при calib_cam_timeoffset: true.

Управление энергопотреблением. Используется PARTIAL_WAKE_LOCK на время работы оценщика и флаг FLAG_KEEP_SCREEN_ON, чтобы исключить паузу камеры при гашении экрана.

Жизненный цикл библиотеки. Реализованы JNI_OnLoad / JNI_OnUnload: при выгрузке нативной библиотеки выполняется останов рабочего потока, очистка очередей и уничтожение VioManager.

4.4 Результаты тестирования

Экспериментальная проверка выполнена на смартфоне Samsung Galaxy S24 (8 ГБ ОЗУ, Android 14). Параметры захвата: 640×480, 30 кадр/с, num_opencv_threads: 1. Проведены три сценария: обход офисного коридора с замкнутым контуром (~50 м), медленная ходьба (~30 м) и быстрые повороты (~20 м). Показатели производительности приведены в таблице 3, точности – в таблице 4.

Таблица 3 – Показатели производительности

Показатель	Коридор	Медленная ходьба	Быстрые повороты
Средняя задержка обработки кадра, мс	28–35	25–32	35–48
Максимальная задержка, мс	62	55	95
Средняя загрузка CPU, %	42–55	38–48	50–68
Доля отброшенных кадров, %	2–5	1–3	8–15
Частота обновления позы, Гц	25–28	26–29	18–24

Таблица 4 – Точност траектории

Сценарий	Длина пути, м (оценка VIO)	Ошибка замыкания, м	Ошибка замыкания, %
Коридор, контур ~50 м	48–52	0,35–0,65	0,7–1,3
Медленная ходьба, ~30 м	29–31	0,15–0,30	0,5–1,0
Быстрые повороты, ~20 м	18–24	0,8–1,5	3–6

В сценарии медленной ходьбы траектория визуально совпадает с геометрией коридора. При непрерывной работе более 4–5 мин наблюдается тепловое дросселирование SoC: средняя задержка возрастает на 15–25 %, доля отброшенных кадров увеличивается до 10–12 %. Основные сценарии деградации: угловая скорость выше 2 рад/с (срыв KLT-трекера), освещённость ниже 50 лк (нехватка устойчивых признаков), однородные поверхности (дрейф из-за слабой текстуры), а также отсутствие замыкания контуров на маршрутах длиннее 100 м.

5. Заключение

В работе описана реализация мобильного приложения для автономного трекинга маршрута на основе OpenVINS. Показано, что перенос MSCKF-оценщика на Android достигается через NDK, JNI и тщательно спроектированный конвейер данных Camera2 + IMU. Ключевые решения, обеспечивающие стабильную работу в условиях ресурсных ограничений мобильной платформы, – схема «производитель–потребитель» с отбраковкой устаревших кадров, аппаратное согласование временных шкал, ограничение параллелизма OpenCV, отключение тяжёлых опциональных модулей и размещение конфигурации во внутреннем хранилище.

Экспериментальная проверка на Samsung Galaxy S24 подтвердила работоспособность системы в режиме, близком к реальному времени (задержка 25–35 мс, ошибка замыкания контура 0,7–1,3% на маршруте ~50 м). Научно-практическая значимость результатов – в разработке и верификации архитектуры ПО, обеспечивающей выполнение ресурсоёмкого алгоритма MSCKF на Android с документированными показателями.

Перспективы развития: учёт эффекта rolling shutter, поддержка нескольких камер, алгоритмы замыкания контуров траектории и количественная оценка точности по внешнему эталону (UWB, Vicon).

Список литературы:

1. Mourikis A. I., Roumeliotis S. I. A Multi-State Constraint Kalman Filter for Vision-aided Inertial Navigation // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – Rome: IEEE, 2007. – С. 3565–3572.

2. Li M., Mourikis A. I. High-precision, consistent EKF-based visual-inertial odometry // The International Journal of Robotics Research. – 2013. – Vol. 32, № 6. – P. 690–711.

3. Geneva P., Eckenhoff K., Lee W., Yang Y., Huang G. OpenVINS: A Research Platform for Visual-Inertial Estimation // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – Paris: IEEE, 2020. – С. 4666–4672.

4. Burri M., Nikolic J., Gohl P., Schneider T., Rehder J., Omari S., Achtelik M. W., Siegwart R. The EuRoC micro aerial vehicle datasets // The International Journal of Robotics Research. – 2016. – Vol. 35, № 10. – P. 1157–1163.

5. Qin T., Li P., Shen S. VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator // IEEE Transactions on Robotics. – 2018. – Vol. 34, № 4. – P. 1004–1020. DOI: 10.1109/TRO.2018.2853729

6. Campos C., Elvira R., Rodríguez J. J. G., Montiel J. M. M., Tardós J. D. ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual–Inertial, and Multimap SLAM // IEEE Transactions on Robotics. – 2021. – Vol. 37, № 6. – P. 1874–1890. DOI: 10.1109/tro.2021.3075644 EDN: KSOUAB

7. Furgale P., Rehder J., Siegwart R. Unified Temporal and Spatial Calibration for Multi-Sensor Systems // Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – Tokyo: IEEE, 2013. – С. 1280–1286. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696514

8. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем: учебное пособие / под общ. ред. В. Я. Распопова; ОАО «Концерн „ЦНИИ „Электроприбор“». – СПб.: ОАО «Концерн „ЦНИИ „Электроприбор“», 2009. – 278 с. ISBN: 978-5-900780-73-3 EDN: QNWJZT

9. Android NDK Guides [Электронный ресурс] // Android Developers. – Режим доступа: https://developer.android.com/ndk/guides (дата обращения: 21.05.2026).

10. Camera2 API Overview [Электронный ресурс] // Android Developers. – Режим доступа: https://developer.android.com/training/camera2 (дата обращения: 21.05.2026).

УДК 519.237.5

Ерохин А. С.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

МЕТОДОЛОГИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ МНОЖЕСТВЕННОЙ РЕГРЕССИИ

Аннотация. Множественная регрессия – ключевой инструмент регрессионного анализа с широким спектром применений. В статье рассматриваются четыре её вида: многомерная линейная регрессия, многовариантная множественная линейная регрессия, мультиномиальная логистическая регрессия и многовариантная нелинейная регрессия.

Многомерная линейная регрессия успешно применяется в производстве и медицине. Многовариантная множественная линейная регрессия обеспечивает более высокую точность при работе с несколькими зависимыми переменными. Мультиномиальная логистическая регрессия эффективно решает задачи с нелинейностью и множественными предикторами, не требуя нормального распределения данных. Многовариантная нелинейная регрессия, напротив, требует глубоких профессиональных знаний для корректного применения.

Статья демонстрирует теоретическую гибкость и практическую широту использования множественного регрессионного анализа в различных областях.

Ключевые слова: множественная линейная регрессия, многовариантная множественная линейная регрессия, мультиномиальная логистическая регрессия, многовариантная нелинейная регрессия.

1. Введение

С начала XX века регрессионный анализ активно развивался, став ключевым инструментом в различных науках. Пионерские работы (Бакст, 1931; Бартлетт, 1938; Максвелл, 1975; Хосмер, 1980) заложили его теоретическую базу и расширили области применения, хотя некоторые многовариантные методы остаются малоизученными.

Одномерные модели часто неэффективны для сложных данных с множеством взаимосвязанных предикторов (например, прогноз цены криптовалюты с учётом 30+ экономических и политических факторов). Множественная регрессия решает эту проблему, значительно повышая точность прогнозов за счёт оптимального комбинирования переменных и учёта их корреляций.

В статье анализируются четыре вида множественной регрессии, их математические особенности, преимущества, ограничения и оптимальные сферы применения.

2. Методы и применения

2.1. Многомерная/множественная линейная регрессия (МЛР)

МЛР моделирует зависимость одной целевой переменной от нескольких предикторов (например, годовые расходы семьи определяются доходом, уровнем цен и процентными ставками). Модель широко применяется в различных сферах.

Производство: прогнозирование профрисков в судостроении с использованием МЛР и генетических алгоритмов. На основе параметров (время, специальность, тип инцидента, опасные условия и действия) рассчитывается Нормализованный индекс риска (NRI, 0–1). Итоговое уравнение модели: $f(x) = -0.535 + 0.067DT + 0.428S + 0.354I + 0.602DS + 0.301DA$ [1].

Социальные науки: оценка уровня стресса, тревожности и депрессии у студентов-медиков с учётом социально-демографических факторов по шкале DASS-21 [2].

Медицина: выявление взаимосвязи между нарушениями дыхания во сне и инсулинорезистентностью у мужчин с избыточным весом на основе комплекса физиологических измерений [3].

МЛР демонстрирует высокую эффективность и широкие перспективы применения в задачах, где результат определяется множественными взаимосвязанными факторами.

2.2. Многовариантная множественная линейная регрессия

Для повышения точности прогнозов при наличии нескольких переменных отклика применяется метод «творог и сыворотка». Это разновидность многомерного сжатия, которая использует корреляции между откликами для снижения ошибки прогнозирования.

Ключевые особенности:

1. вместо изолированных оценок МНК (метода наименьших квадратов) для каждого отклика применяется их линейная комбинация;

2. процесс управляется матрицей сжатия B*B*, преобразующей обычные МНК-оценки в смещённые, но статистически более точные. Оптимальная матрица $B*$ минимизирует ожидаемую ошибку: E(y −ỹ)^2 < E(y−ŷ)^2;

3. Метод концептуально близок к гребневой регрессии, регрессии по главным компонентам (PCR) и PLS.

Практическая ценность: даже если исследователя интересует только одна целевая переменная, включение коррелированных с ней переменных в качестве дополнительных откликов существенно улучшает точность прогноза. Метод эффективен, однако требует осторожности: не все измеряемые в данных переменные могут быть валидны для реальных условий прогнозирования.

2.3. Мультиномиальная логистическая регрессия

2.3.1. Множественная логистическая регрессия

Логарифмически-линейные модели, преобразованные через логит-процесс, образуют логистическую регрессию, позволяющую анализировать связь между множественными предикторами и дихотомической (бинарной) зависимой переменной.

Математическая модель.

- **Логит-уравнение:**

$$\log(\text{odds}) = \text{Logit}(p) = \text{Logit}[P(Y=1)] = \ln\left(\frac{\pi(x)}{1-\pi(x)}\right) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right)$$

$$= \ln\left[\exp\left(\beta_0 + \sum_{i=1}^{n}\beta_i x_i\right)\right] = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n}\beta_i x_i$$

- **Вероятность события:**

$$p = \pi(x) = \frac{\exp\left(\beta_0 + \sum_{i=1}^{n}\beta_i x_i\right)}{1+\exp\left(\beta_0 + \sum_{i=1}^{n}\beta_i x_i\right)}$$

Параметры: p – вероятность целевого события; $1-p$ – вероятность противоположного исхода; n – число предикторов; $\beta 0$ – свободный член; xi и βi – i-й фактор и его коэффициент.

Применение и развитие: Модель широко используется в медицине (скрининг диабета [4]), геологии (картирование гидротермальных изменений [5]) и других областях. Мультиномиальные модели представляют собой логическое расширение бинарного случая для работы с категориальными данными, сохраняя при этом простоту интерпретации и отсутствие требований к нормальному распределению предикторов [6].

2.3.2. Номинальная и порядковая логистическая регрессия

В случае логистической модели, обсуждавшейся ранее для бинарных данных, иногда возможно, чтобы переменная отклика принимала три или более значений. В зависимости от типа переменной отклика она делится на номинальную логистическую регрессию и порядковую логистическую регрессию [7].

Когда имеется три или более категории без естественного порядка, можно использовать номинальную логистическую регрессию, при которой логарифмическая вероятность исхода моделируется как линейная комбинация предикторных переменных. Когда три или более категории имеют естественный порядок уровней, можно использовать альтернативную формулу, называемую последовательной логистической регрессией, но ранжирование уровней не обязательно означает, что они равноудалены.

Когда номинальная или порядковая соответствующая переменная имеет более одной категории, модель мультиномиального логита принимает форму сопряжения каждой категории с базовой категорией, обычно принимая последнюю категорию в качестве референсной:

$$\ln\left(\frac{\pi_j(x_i)}{\pi_J(x_i)}\right) = \ln\left(\frac{p_j}{p_J}\right) = \beta_{j0} + \sum_{i=1}^{n} \beta_{ji} x_i \,, j = 1,2,3, \dots, J-1$$

$$p_1 + p_2 + \cdots + p_J = 1$$

Модель для логарифма шансов имеет вид Уравнения:

$$\log(\pi_j(x_i)) = \frac{\exp\left(\beta_{j0} + \sum_{i=1}^{n} \beta_{ji} x_i\right)}{1 + \sum_{j=1}^{J-1} \exp\left(\beta_{j0} + \sum_{i=1}^{n} \beta_{ji} x_i\right)}$$

Оценка параметров модели осуществляется методом максимального правдоподобия (ММП).

Метод номинальной или порядковой логистической регрессии также имеет различные применения, когда форма данных является подходящей. Например, в статье Оваскайнена и соавторов моделировалась подобная многовариантная логистическая регрессия симбиоза видов для формирования новых гипотез о взаимодействиях грибов [8]. Исследование, проведённое Франгосом и соавторами, выявило значимые факторы риска негативных психологических убеждений об использовании интернета среди студентов университетов в Греции путём построения модели порядковой логистической регрессии [9].

Логистическая регрессионная модель обладает двумя основными преимуществами.

1. Модель логистической регрессии может эффективно решать задачи с нелинейностью и множественными независимыми переменными, а также оценивать степень влияния соответствующих переменных на зависимую переменную.

2. Модель не требует соблюдения переменными многомерного нормального распределения и имеет более широкую область применения.

2.4. Многовариантная нелинейная регрессия

Для решения задач с многовариантной и нелинейной регрессией часто используется новый метод, называемый симплекс-алгоритмом, основанный на обычном методе наименьших квадратов, который является относительно простым, а эффект и скорость сходимости – идеальными. При освоении обычного метода наименьших квадратов ключом к решению вышеуказанных задач является определение типа кривой и способа её преобразования в линейную модель. Определение типа кривой обычно рассматривается с двух аспектов:

1. теоретический вывод или предположение на основе опыта согласно профессиональным знаниям;

2. определение общего типа кривой путём построения и наблюдения диаграммы рассеяния, когда профессиональных знаний недостаточно.

С целью оценки потребности в энергии освещения помещений при изменении параметров характеристик в данном исследовании использовался метод, основанный на серии статистических анализов, применённых к результатам большого количества симуляций [10].

Для начала были определены параметры, влияющие на количество дневного света в помещении и потребность в энергии соответствующего электрического освещения. Затем с помощью динамического моделирования освещения были проанализированы годовые условия освещённости и потребность в энергии для ряда комбинаций целевого помещения. Для этой цели использовалась программа Daysim, которая рассчитывает дневное освещение посредством годовых симуляций на основе динамического климата.

Таблица 1 – Сводка проектных переменных

Место	**Берлин, Германия (Ш=52,3° с.ш.)**	**Турин, Италия (Ш=45,2° с.ш.)**	**Катания, Италия (Ш=37,5° с.ш.)**
Глубина помещения РГ [м]	3; 4,5; 6; 7,5; 9	4,5; 6; 7,5; 9; 10,5; 12	10,5; 12
Отношение площади окна к стене ООС [-]	0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6	0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6	0,4; 0,5; 0,6
Угол заграждения УЗ [°]	0; 15; 30; 45; 60; 75	0; 15; 30; 45; 60; 75	30; 45; 60; 75
Ориентация помещения ОР	юг	север	запад
Средняя целевая освещённость Е [лк]	150; 300; 500; 750	150; 300; 500; 750	300; 500; 750

Система управления освещением:

1. Вручную (MAN);
2. автоматическая, реагирующая на дневной свет (DR).

В Таблице 1 представлен общий обзор проектных переменных, используемых в симуляциях Daysim на различных этапах процесса анализа.

Verso генерирует подбазу данных в качестве основы для статистического анализа с целью построения двух математических моделей для прогнозирования потребности помещения в энергии при использовании ручных систем. В статистическом анализе методы регрессии используются для определения математической модели, подходящей для немедленного предоставления хорошей оценки функции потребности в энергии. После объяснения объясняющих переменных, таких как местоположение и направление, математическая модель может быть получена с помощью нелинейного множественного регрессионного анализа. Регрессируются различные нелинейные модели. Все регрессии основаны на объясняющих

переменных, действующих на потребность в энергии после логарифмического преобразования. Для упрощения модели до линейной модели объясняющие переменные и переменные отклика подвергаются соответствующему преобразованию, после чего выполняется множественная линейная регрессия с использованием программного пакета SPSS.

Также проводится статистический анализ, включая среднюю ошибку смещения (MBE) (нормализованная средняя ошибка смещения – NMBE), среднеквадратичную ошибку (MSE), корень из среднеквадратичной ошибки (RMSE) и коэффициент вариации (CV), чтобы оценить, насколько близко оценочные значения потребности в энергии соответствуют смоделированным значениям. Эти статистические показатели представлены ниже:

$$\mathrm{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^{828} \mathrm{ED}_{\mathrm{estimated}} - \mathrm{ED}_{\mathrm{stimulated}}}{828}$$

$$\mathrm{NMBE} = \frac{\mathrm{MBE}}{\mathrm{mean}(\mathrm{ED}_{\mathrm{stimulated}})}$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\mathrm{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{828} (\mathrm{ED}_{\mathrm{estimated}} - \mathrm{ED}_{\mathrm{stimulated}})^2}{828}}$$

$$\mathrm{CV} = \frac{\mathrm{RMSE}}{\mathrm{mean}(\mathrm{ED}_{\mathrm{stimulated}})}$$

Однако Пеллегрино и соавторы успешно использовали многовариантную нелинейную регрессию для решения данной задачи. Во многих случаях без глубоких профессиональных знаний трудно получить правильную модель.

3. Заключение

В данной статье раскрывались уравнения и области применения четырёх типов различных регрессий. Каждый вид регрессии подходит для различных ситуаций, что подтверждается поиском примеров и статей.

- **Многомерная линейная регрессия** широко применяется во многих областях, таких как производственная отрасль, гуманитарные и социальные науки, а также медицинская сфера. В цитируемых статьях явления, на которые влияют множественные переменные, могут быть смоделированы как многомерная линейная регрессия.
- **Многовариантная множественная линейная регрессия** требуется, когда необходимо прогнозировать более одной величины, и одна величина всегда зависит от нескольких предикторных переменных для обеспечения более высокой точности.
- **Мультиномиальная логистическая регрессия** включает несколько регрессионных моделей, трансформирующихся в зависимости от

типов данных. Трансформированная модель имеет широкий диапазон применения.

- **Многовариантная нелинейная регрессия** требует разнообразных профессиональных знаний для моделирования.

В заключение, множественная регрессия является существенным подходом при прогнозировании переменных отклика при наличии более одной объясняющей переменной.

Список литературы:

1. Tsoulas V. D., Fragiadakis N. G. Prediction of Occupational Risk in the Shipbuilding Industry Using Multivariable Linear Regression and Genetic Algorithm Analysis // Safety Science. – 2016. – Vol. 83. – P. 12–22. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.11.010

2. Iqbal S., Gupta S., Venkatarao E. Stress, anxiety & depression among medical undergraduate students & their socio-demographic correlates // The Indian Journal of Medical Research. – 2015. – Vol. 141. – P. 354–357. DOI: 10.4103/0971-5916.156571

3. Punjabi N. M., Sorkin J. D., Katzel L. I., Goldberg A. P., Schwartz A. R., Smith P. L. Sleep-disordered Breathing and Insulin Resistance in Middle-aged and Overweight Men // American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. – 2002. – Vol. 165. – P. 677–682. DOI: 10.1164/ajrccm.165.5.2104087 EDN: EYACWZ

4. Tabaei B. P., Herman W. H. A multivariate logistic regression equation to screen for diabetes // Diabetes Care. – 2002. – Vol. 25, № 11. – P. 1999–2003. DOI: 10.2337/diacare.25.11.1999

5. Mokhtari R. Hydrothermal alteration mapping through multivariate logistic regression analysis of lithogeochemical data // Journal of Geochemical Exploration. – 2014. – Vol. 145. – P. 207–212. DOI: 10.1016/j.gexplo.2014.06.008

6. El-Habil M. An Application on Multinomial Logistic Regression Model // Pakistan Journal of Statistics and Operation Research. – 2012. – Vol. 8, № 2. – P. 271–291. DOI: 10.18187/pjsor.v8i2.234

7. Hedeker D. Multilevel Models for Ordinal and Nominal Variables // Handbook of Multilevel Analysis / ed. by J. de Leeuw, E. Meijer. – Dordrecht : Springer, 2008. – P. 237–274. DOI: 10.1007/978-0-387-73186-5_6

8. Ovaskainen O., Hottola J., Siitonen J. Modeling species co-occurrence by multivariate logistic regression generates new hypotheses on fungal interactions // Ecology. – 2010. – Vol. 91, № 8. – P. 2514–2521. DOI: 10.1890/10-0173.1

9. Frangos C. C., Frangos C. C., Sotiropoulos I. Problematic Internet Use among Greek university students: an ordinal logistic regression with risk factors of negative psychological beliefs, pornographic sites, and online games // Cyberpsychology, Behavior and Social Networking. – 2011. – Vol. 14, № 1–2. – P. 51–58. DOI: 10.1089/cyber.2009.0306

10. Lo Verso V. R. M., Pellegrino A., Pellerey F. A multivariate non-linear regression model to predict the energy demand for lighting in rooms with different architectural features and lighting control systems // Energy and Buildings. – 2014. – Vol. 76. – P. 151–163. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.02.063

УДК 004.89

Борискин М. А.
Научный руководитель: Парамонов Н. Б., д.т.н., профессор
МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ ФИТНЕС-РЕКОМЕНДАЦИЙ НА ОСНОВЕ ДИНАМИКИ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Аннотация: в статье предложен адаптивный алгоритм формирования персонализированных фитнес-рекомендаций (ААФР), учитывающий временну́ю динамику физиологических показателей пользователей носимых устройств. Описаны этапы алгоритма: предобработка временны́х рядов, прогноз состояния на основе сети LSTM с механизмом внимания, расчет интегрального индекса усталости и выбор параметров тренировки. Экспериментальное сравнение с базовым неадаптивным алгоритмом по метрикам MAE, RMSE, Precision@K и Recall@K подтвердило повышение качества рекомендаций.

Ключевые слова: рекомендательные системы, анализ временны́х рядов, физиологические данные, машинное обучение, нейронная сеть LSTM, механизм внимания, адаптивные фитнес-рекомендации.

Введение

Рынок носимых устройств – смарт-часов, фитнес-браслетов, нагрудных датчиков – демонстрирует устойчивый рост, а вместе с ним растет запрос пользователей на персонализированные рекомендации по тренировкам и восстановлению. Современные устройства непрерывно фиксируют ряд физиологических показателей: вариабельность сердечного ритма (HRV), частоту сердечных сокращений (ЧСС) покоя, продолжительность и качество сна, уровень стресса. Однако большинство существующих систем трактуют эти данные как статический снимок текущего состояния (point-in-time measurement), игнорируя их временну́ю динамику [7].

Между тем интерпретация любого физиологического показателя принципиально зависит от предшествующей истории наблюдений. Так, ЧСС покоя 60 уд/мин после ночи глубокого сна (7–8 ч, HRV = 65 мс) свидетельствует о хорошем восстановлении и готовности к нагрузке, тогда как та же ЧСС покоя 60 уд/мин после бессонной ночи (4 ч, HRV = 28 мс) указывает на глубокое утомление и высокий риск перетренированности. Следовательно, более информативным входом для системы рекомендаций является не мгновенное значение, а временно́й ряд физиологических данных.

Целью настоящей работы является повышение качества персонализированных фитнес-рекомендаций за счет разработки адаптивного алгоритма формирования рекомендаций (ААФР), учитывающего временну́ю динамику физиологических показателей. Научная новизна заключается в

формализации интегрального индекса физиологического состояния на основе скользящих статистик и трендов с последующим преобразованием прогноза в параметры тренировки. Практическая значимость подтверждается экспериментальным сравнением с базовым неадаптивным алгоритмом по метрикам MAE, RMSE, Precision@K и Recall@K.

Постановка задачи и данные

Временно́й ряд физиологических данных представляет собой последовательность наблюдений $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$, упорядоченную по моментам времени, где x_t – вектор физиологических признаков за сутки t (HRV, ЧСС покоя, продолжительность сна, уровень стресса). Для физиологических рядов характерны нестационарность, наложение нескольких периодов (суточный, недельный) и пропуски в данных; методы машинного обучения позволяют выявлять такие паттерны [9].

Задача формулируется следующим образом: по истории наблюдений за период до текущего дня сформировать рекомендацию r = (тип тренировки, интенсивность, длительность, коэффициент уверенности), согласованную с прогнозируемым физиологическим состоянием пользователя. В качестве анализируемого окна принят интервал последних 14 суток, обеспечивающий охват недельной периодичности тренировочных циклов.

Адаптивный алгоритм формирования рекомендаций (ААФР)

Разработан метод формирования адаптивных фитнес-рекомендаций, реализованный в виде алгоритма ААФР из четырех последовательных этапов.

Этап 1. Предобработка временно́го ряда: устранение выбросов, интерполяция пропусков и нормирование показателей. Для каждого показателя рассчитываются скользящие статистики – средние значения за 7 суток и линейные тренды (коэффициенты наклона) за 14 суток. Сформированное скользящее окно подается на вход модели прогнозирования.

Этап 2. Прогноз физиологического состояния. Архитектурно за прогноз отвечает рекуррентная нейронная сеть с долговременной памятью (LSTM) [1] и ее упрощенная модификация GRU [2], дополненные механизмом внимания [3, 4]: LSTM избирательно удерживает долгосрочные паттерны (многонедельные тренировочные циклы) и отфильтровывает краткосрочный шум, а механизм внимания динамически взвешивает значимость отдельных временны́х шагов. Прогноз агрегируется в скалярный интегральный индекс усталости fatigue_score – взвешенную сумму штрафных и поощрительных баллов по скользящим средним и трендам HRV, ЧСС покоя, сна и стресса. Веса (3, 2, 2, 2, 3, 2) подобраны так, чтобы значение fatigue_score ≥ 5 соответствовало состоянию, требующему снижения нагрузки, fatigue_score ≥ 2 – умеренной интенсивности, а fatigue_score < 2 – готовности к высокоинтенсивным тренировкам.

Этап 3. Выбор параметров тренировки. По значению индекса усталости детерминированно определяются интенсивность (низкая / умеренная / высокая), длительность и тип тренировки. При высокой усталости (fatigue_score ≥ 5) тип принудительно заменяется на восстановительную активность («Восстановительная ходьба», «Легкая растяжка»). Дополнительно учитываются медицинские ограничения пользователя: при наличии противопоказаний к высокоинтенсивным нагрузкам система принудительно выбирает низкую интенсивность вне зависимости от значения индекса.

Этап 4. Расчет коэффициента уверенности рекомендации по формуле confidence = min(0,95; 0,60 + data_quality · 0,20 + bonus), где data_quality = min(1,0; N / 14) – доля накопленных данных относительно оптимального 14-дневного окна (N – число доступных суточных записей), bonus = 0,10 при fatigue_score < 5. При полном наборе данных и умеренной усталости достоверность достигает 0,90. Базовый (неадаптивный) алгоритм, используемый для сравнения, опирается только на статический профиль пользователя – уровень подготовки и цель – и не учитывает временны́е данные; его коэффициент уверенности зафиксирован на уровне 0,55.

Следует отметить, что в программном прототипе прогностический модуль реализован детерминированным приближением на основе индекса усталости fatigue_score; полная интеграция обученной LSTM-модели с механизмом внимания составляет направление дальнейшего развития работы.

Программная реализация

Прототип системы АРС-Фитнес реализован на языке Python 3.11. Серверная часть построена на асинхронном веб-фреймворке FastAPI с автоматической генерацией OpenAPI-документации; доступ к данным организован через ORM SQLAlchemy 2.0 с управлением миграциями средствами Alembic, что обеспечивает переносимость схемы и переход с прототипной СУБД SQLite на продакшн-конфигурацию PostgreSQL 15. Получение рекомендации выполняется через REST-эндпоинт GET /api/users/{user_id}/recommendations, который загружает историю физиологических записей пользователя, передает ее в алгоритм ААФР и возвращает структурированный ответ с типом, интенсивностью и длительностью тренировки, перечнем повлиявших факторов и коэффициентом уверенности. Клиентская часть включает веб-приложение на React 18 и мобильный клиент для платформы iOS, получающий физиологические данные через фреймворк HealthKit [10].

Экспериментальная оценка

Для оценки эффективности адаптивного алгоритма в сравнении с базовым разработана методика расчета метрик качества. Тестирование проводилось на синтетической выборке, включающей записи четырех

пользователей с различными профилями за 45 суток наблюдений. Оценка выполнялась на скользящем окне последних 14 суток: для каждого дня окна формировалась эталонная (ground truth) рекомендация на основе объективных физиологических порогов, после чего сравнивалась с предсказанием модели.

Использованы четыре метрики. MAE (средняя абсолютная ошибка) и RMSE (среднеквадратичная ошибка) рассчитываются по комбинированному показателю, объединяющему ошибку по интенсивности и нормированную ошибку по длительности: combined_error = |pred_int − gt_int| + |pred_dur − gt_dur| / 30. Precision@K (K = 3) – доля рекомендаций, в которых предсказанный тип тренировки входит в множество релевантных для данного дня; Recall@K (K = 3) – полнота охвата релевантных типов. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение метрик качества адаптивного и базового алгоритмов

Метрика	**Адаптивный алгоритм**	**Базовый алгоритм**	**Улучшение**
MAE	0,847	1,432	−40,8 %
RMSE	1,094	1,876	−41,7 %
Precision@3	0,714	0,476	+50,0 %
Recall@3	0,653	0,441	+48,1 %

Адаптивный алгоритм демонстрирует превосходство по всем четырем метрикам: снижение MAE на 40,8 % и RMSE на 41,7 % свидетельствует о более точном предсказании интенсивности и длительности тренировки, а рост Precision@3 на 50,0 % означает, что предлагаемый тип тренировки соответствует текущему физиологическому состоянию пользователя в 71,4 % случаев против 47,6 % у базового алгоритма. Улучшение объясняется способностью алгоритма учитывать временны́е тренды: при устойчивом снижении HRV система превентивно снижает нагрузку за 2–3 дня до появления явных признаков перетренированности, тогда как базовый алгоритм игнорирует эти сигналы, опираясь исключительно на статический профиль пользователя [7, 8].

Заключение

В работе предложен и экспериментально проверен адаптивный алгоритм формирования персонализированных фитнес-рекомендаций (ААФР), учитывающий временну́ю динамику физиологических показателей. Ключевая гипотеза – о том, что учет временно́й динамики повышает качество рекомендаций – подтверждена: по сравнению с базовым неадаптивным алгоритмом достигнуто снижение MAE на 40,8 % и RMSE на 41,7 % при росте Precision@3 на 50,0 % и Recall@3 на 48,1 %. Научная новизна состоит в формализации интегрального индекса физиологического состояния и его

преобразовании в параметры тренировки с расчетом коэффициента уверенности. Направлениями дальнейшего развития являются обучение полной LSTM-модели с механизмом внимания на открытых датасетах физиологических данных носимых устройств (WESAD [6], LifeSnaps), применение интерпретируемых архитектур (Temporal Fusion Transformer [5]) и расширение объема размеченных данных.

Список литературы:

1. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // Neural Computation. – 1997. – Vol. 9, No. 8. – P. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
2. Cho K., van Merriënboer B., Gulcehre C., Bahdanau D., Bougares F., Schwenk H. Learning phrase representations using RNN encoder–decoder for statistical machine translation // Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP). – 2014. – С. 1724–1734.
3. Bahdanau D., Cho K., Bengio Y. Neural machine translation by jointly learning to align and translate [Electronic resource] // arXiv preprint. – arXiv:1409.0473, 2014. – URL: https://arxiv.org/abs/1409.0473 (accessed: 07.06.2026).
4. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser L., Polosukhin I. Attention is all you need // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. – Vol. 30. – P. 5998–6008.
5. Lim B., Arık S. Ö., Loeff N., Pfister T. Temporal Fusion Transformers for interpretable multi-horizon time series forecasting // International Journal of Forecasting. – 2021. – Vol. 37, No. 4. – P. 1748–1764. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2021.03.012 EDN: QOANAB
6. Schmidt P., Reiss A., Dürichen R., Marberger C., Van Laerhoven K. Introducing WESAD, a multimodal dataset for wearable stress and affect detection // Proceedings of the 2018 International Conference on Multimodal Interaction (ICMI ’18). – Boulder, CO, USA, 16–20 Oct. 2018. – P. 400–408.
7. Walenczykowska M., Kawalec A., Krenc K. An application of analytic wavelet transform and convolutional neural network for radar intrapulse modulation recognition // Sensors (Basel). – 2023. – Vol. 23, No. 4. – Art. 1986. – P. 1986. DOI: 10.3390/s23041986 EDN: TVYTRX
8. Степанов К.Д., Дружинина О.В. Использование рекуррентных нейронных сетей для прогнозирования показателей вибрационной нагрузки // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2025. – Т. 27. – № 3. – С. 5–12. DOI: https://doi.org/10.18127/j19998554-202503-01
9. Флах П. Машинное обучение : наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / П. Флах ; пер. с англ. А. А. Слинкина. – Москва : ДМК Пресс, 2015. – 399 с. ISBN 978-5-97060-273-7
10. Apple Developer Documentation. HealthKit Framework [Электронный ресурс]. – URL: https://developer.apple.com/documentation/healthkit (дата обращения: 15.03.2026).

УДК 004.89 + 004.41

Елисеев Эдуард
Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ: ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Аннотация: Статья посвящена анализу применения мультиагентных систем искусственного интеллекта для автоматизации процессов жизненного цикла разработки программного обеспечения. В статье рассматриваются архитектурные модели МАС и современные подходы к их оркестрации, включая графовые фреймворки и Retrieval–Augmented Generation. Особое внимание уделяется прикладным задачам, таким как автоматизированный код–ревью, генерация тестов и документирование. Проанализированы ключевые проблемы внедрения, включая галлюцинации языковых моделей, вопросы безопасности и экономической эффективности. Выявлены основные тенденции развития и существующие ограничения в данной области.

Ключевые слова: искусственный интеллект, разработка программного обеспечения, мультиагентные системы, большие языковые модели, генерация тестов, код–ревью

1. Введение

Современная разработка программного обеспечения характеризуется неуклонным возрастанием сложности проектов, необходимостью интеграции множества технологий и соблюдения строгих стандартов качества при одновременном сокращении time–to–market. В этих условиях традиционные монолитные инструменты автоматизации демонстрируют ограниченную эффективность при решении комплексных многоэтапных задач жизненного цикла разработки ПО (SDLC – Software Development Lifecycle).

Появление больших языковых моделей (LLM – Large Language Models), таких как GPT–4, Claude, DeepSeek–Coder, а также технологий Retrieval – Augmented Generation (RAG – генерация с дополнением извлеченной информацией) открыло принципиально новые возможности для создания автономных мультиагентных систем (МАС). Согласно ряду исследований, внедрение МАС позволяет повысить производительность команд разработки на 30–50% в рутинных задачах, сократить время код–ревью на 60–80% и увеличить тестовое покрытие до 85–90% [5].

Мультиагентная система определяется как множество взаимодействующих интеллектуальных агентов, каждый из которых способен автономно воспринимать окружающую среду, принимать решения и

выполнять действия для достижения поставленных целей. В контексте SDLC агенты специализируются на конкретных аспектах: анализе кода, тестировании, документировании, развертывании [2, 3].

Систематические обзоры 2024–2025 годов фиксируют растущий интерес к применению МАС на базе больших языковых моделей в программной инженерии. В частности, Marcel Veselka (2024) провел подчеркивает, что лишь 15–35% усилий разработчиков приходится на фазу непосредственной реализации кода [7]. Также, He, Treude и Lo (2024) [6] провели систематический обзор 71 первичного исследования, категоризируя работы по этапам жизненного цикла разработки ПО (SDLC):

- инженерия требований (Requirements Engineering);
- генерация кода (Code Generation);
- обеспечение качества (Quality Assurance – включая тестирование и отладку);
- сопровождение ПО (Software Maintenance);
- сквозная разработка (End–to–End Development), охватывающая несколько этапов.

Авторы подчеркивают, что МАС демонстрируют высокую эффективность в задачах умеренной сложности (например, генерация простых игр), однако сталкиваются с ограничениями при работе над сложными проектами, требующими глубокого логического вывода и абстракции. Это обосновывает необходимость дальнейших исследований в области масштабирования агентных архитектур, улучшения координации между агентами и интеграции инструментов верификации.

Несмотря на значительный рост числа публикаций, существующие обзоры преимущественно сосредоточены на отдельных аспектах (генерация кода, тестирование) и не предоставляют интегрированного аналитического взгляда на весь спектр прикладных задач МАС в SDLC. Цель настоящего обзора – восполнить данный пробел посредством систематизации, критической оценки и сопоставления результатов исследований в области, автоматизированного код–ревью, генерации тестов, документирования и визуального тестирования с учетом архитектурных решений и технологий оркестрации агентов.

2. Методология обзора

2.1. Стратегия поиска

Поиск литературы проводился в базах данных Scopus, Web of Science, Google Scholar, eLibrary (РИНЦ) и репозитории препринтов arXiv в период с января 2020 по март 2026 года. Использовались следующие ключевые слова и их комбинации: «multi–agent systems software engineering», «LLM unit test generation», «AI code review», «automated documentation LLM», «visual testing AI agents», «LangGraph orchestration», «RAG software development», а также

русскоязычные эквиваленты: «мультиагентные системы разработка ПО», «автоматизация тестирования ИИ», «генерация документации LLM».

2.2. Критерии включения и исключения

Критерии включения: (1) публикации рецензируемых журналов и конференций, препринты arXiv с верифицируемыми экспериментальными данными; (2) индустриальные отчеты с количественными метриками; (3) документация и технические описания open–source проектов. Критерии исключения: (1) публикации без эмпирических данных или без описания методологии; (2) работы, не связанные напрямую с автоматизацией SDLC; (3) дублирующие публикации.

2.3. Результаты отбора

По результатам первичного поиска было выявлено более 200 потенциально релевантных источников. После применения критериев включения и исключения, удаления дубликатов и анализа полнотекстовых версий было отобрано 62 источника, составивших основу настоящего обзора. Из них: 28 – статьи в рецензируемых журналах и материалы конференций; 18 – препринты arXiv с экспериментальными результатами; 9 – индустриальные отчеты и аналитические обзоры; 7 – техническая документация и описания проектов.

3. Архитектурные модели и технологии оркестрации MAC

3.1. Классификация архитектурных моделей

В литературе выделяются три базовые архитектуры организации мультиагентных систем для разработки ПО.

Централизованная архитектура предполагает наличие единого агента–координатора (супервизора), управляющего распределением задач между специализированными агентами. Достоинства данной модели включают строгий контроль над процессом выполнения, упрощение отладки и предсказуемость поведения. Существенным ограничением является создание единой точки отказа и потенциальное «бутылочное горлышко» при масштабировании [14].

Децентрализованная архитектура обеспечивает прямое взаимодействие агентов без центрального координатора. AgentNet (2025) представляет пример такой архитектуры на основе RAG, где агенты динамически специализируются и маршрутизируют задачи в структуре направленного ациклического графа (DAG). Преимуществом является высокая отказоустойчивость и масштабируемость, однако ценой более сложных механизмов координации [18].

Иерархическая архитектура объединяет преимущества обоих подходов, организуя агентов в многоуровневую структуру с локальными координаторами. Данная модель позволяет формировать специализированные

«команды» агентов для различных этапов SDLC, каждая с собственным координатором, при наличии общего оркестратора на верхнем уровне.

Критическая оценка показывает, что выбор архитектуры существенно зависит от специфики задачи. Для CI/CD–конвейеров с предсказуемым потоком задач предпочтительна централизованная модель; для масштабируемых распределенных систем – децентрализованная; для комплексных проектов, объединяющих множество этапов SDLC, – иерархическая.

Таблица 1 - Характеристики

Характеристика	**Централизованная**	**Децентрализованная**	**Иерархическая**
Отказоустойчивость	Низкая (единая точка отказа)	Высокая	Средняя
Масштабируемость	Ограниченная	Высокая	Высокая
Сложность реализации	Низкая	Высокая	Средняя
Контролируемость	Высокая	Низкая	Средняя
Типичное применение	CI/CD–пайплайны	Распределенные системы	Комплексные проекты SDLC

3.2. Графовая оркестрация: LangGraph

LangGraph представляет собой графовый фреймворк для создания многоагентных workflow, где каждый узел представляет отдельного агента, а ребра определяют потоки данных и условия передачи управления. Фреймворк обеспечивает декларативное описание графов взаимодействия, управление состоянием между узлами (через неизменяемые структуры данных), поддержку условных переходов, циклических выполнений и параллельного запуска агентов [23, 29].

Анализ литературы демонстрирует широкое применение LangGraph в различных областях: от систем перевода до промышленной оптимизации. В 2024–2025 годах фреймворк стал де–факто стандартом для оркестрации LLM–агентов.

Существенным преимуществом LangGraph является поддержка шаблонов «scatter–gather» (распределение задач и консолидация результатов) и «pipeline parallelism» (конвейерная параллельная обработка), что позволяет эффективно реализовывать мультиагентные CI/CD–пайплайны. Также доступна Java–реализация – LangGraph4j, обеспечивающая нативную интеграцию с Spring Framework и экосистемой JVM [21].

Вместе с тем, в литературе отмечаются и ограничения: сложность отладки распределенных агентов, проблемы согласованности состояния при параллельном обновлении несколькими агентами, а также требование к разработчикам иметь опыт работы с распределенными системами [23].

3.3. Retrieval–Augmented Generation (RAG) для специализации агентов

Технология RAG позволяет агентам получать доступ к актуальной информации, не содержащейся в обучающих данных LLM: документации проекта, стандартам разработки, истории багов и архитектурным описаниям. Для реализации RAG используются специализированные векторные базы данных (Weaviate, Qdrant), обеспечивающие семантический поиск и гибридные запросы [10].

Ряд исследований показывает, что применение RAG в контексте генерации тестов может как повышать, так и снижать эффективность – в зависимости от качества и релевантности извлекаемых примеров. Данный аспект подробнее рассматривается в разделе 4.2 [20].

4. Применение МАС для генерации и выполнения тестов

4.1. Генерация юнит–тестов: LLM vs. классические инструменты

Одним из наиболее исследованных направлений является сравнение эффективности LLM–агентов и классических инструментов генерации тестов. Три ключевых эмпирических исследования формируют основу доказательной базы в данной области.

Исследование 1. Yang et al. (2024) в работе «On the Evaluation of Large Language Models in Unit Test Generation» (arXiv:2406.18181) провели масштабное сравнение пяти открытых LLM (CodeLlama–7B, CodeLlama–13B, Phind–34B, DeepSeek–Coder–7B, DeepSeek–Coder–33B), коммерческой GPT–4 и классического инструмента EvoSuite на 17 Java–проектах. Результаты однозначно показали превосходство EvoSuite: линейное покрытие 78,91% и покрытие ветвлений 76,59% – существенно выше лучшего LLM–результата (GPT–4: 40,43% и 31,78% соответственно).

Авторы связывают отставание LLM с высокой долей синтаксически невалидных тестов из–за галлюцинаций. При этом выявлено критическое влияние дизайна промпта: эффективность зависит от стиля описания (естественный язык vs. код с комментариями), причем разные модели предпочитают разные форматы. Техника Chain–of–Thought (CoT) помогает только моделям с сильным пониманием кода (DeepSeek–Coder), но ухудшает результаты CodeLlama [11].

Исследование 2. Авторы работы «A System for Automated Unit Test Generation Using Large Language Models and Assessment of Generated Test Suites» (arXiv:2408.07846) подтвердили аналогичные выводы: несмотря на высокое покрытие строк (87,9% instruction coverage у GPT–4), мутационное покрытие составило лишь 54–55% (у человеческих тестов – 69%, у EvoSuite – выше 70%). Только 34% сгенерированных LLM тестов проходят без ошибок («green suite»), причем основные причины – некорректные импорты, синтаксические ошибки и вызовы несуществующих методов.[4]

Исследование 3. Работа «Unit Test Generation using Generative AI: A Comparative Performance Analysis of Autogeneration Tools» предлагает более сбалансированную перспективу, сравнивая ChatGPT с Pynguin (аналог EvoSuite для Python). Ключевой вывод – минимальное пересечение пропущенных строк между двумя инструментами: при объединении тестовых наборов покрытие увеличивается в среднем на 31 строку.

Критический анализ совокупности исследований позволяет сформулировать следующие выводы: (а) на текущем этапе LLM не способны заменить классические инструменты генерации тестов в задачах, требующих высокого покрытия ветвлений и обнаружения дефектов; (б) LLM обеспечивают значительно более высокую читаемость кода тестов; (в) оптимальная стратегия – гибридный подход, сочетающий LLM для генерации «высокоуровневых» тестов и классические инструменты для проработки граничных случаев.

4.2. Влияние промпт–инженерии и RAG

Исследования показывают, что RAG может снижать эффективность генерации тестов, если извлеченные примеры (написанные человеком) не соответствуют стилю LLM–генерации. Человек пишет 2–3 тщательных теста на метод, тогда как LLM генерирует в среднем 6,94 более простых теста. При подключении RAG с человеческими примерами LLM пытается имитировать «человеческий» стиль, допуская больше ошибок (использование несуществующих моков, неправильные API–вызовы), что снижает Compilation Success Rate [11].

Данное наблюдение существенно для проектирования MAC: RAG–компонент агента тестирования должен использовать базу примеров, сгенерированных в стиле, совместимом со стилем конкретной LLM, а не универсальную человеческую базу.

4.3. Интеграционное тестирование и тестирование ИИ–агентов

Отдельным направлением является генерация интеграционных тестов. Команда GitAuto продемонстрировала подход, при котором агент создает тесты для проверки API–функций (например, is_repo_forked() проекта GitHub Actions), используя двухуровневую систему задач: родительскую с общими требованиями и дочерние с уточнениями для каждой функции. Генерированные тесты успешно прошли CI/CD–проверку в GitHub Actions, при этом система обладает самокоррекцией: при падении тестов агент самостоятельно анализирует логи и исправляет код [30].

Исследование «An Empirical Study of Testing Practices in Open Source AI Agent Frameworks and Agentic Applications» (2024) впервые провело масштабный анализ практик тестирования в экосистеме агентных фреймворков (39 проектов) и приложений на их основе (439 проектов). Данная работа выявила существенные пробелы в тестировании самих ИИ–агентов, что

представляет одно из наиболее перспективных направлений для будущих исследований [14].

5. Автоматизированный код–ревью

5.1. Современное состояние

Применение ИИ–агентов для код–ревью демонстрирует стремительный рост: по данным анализа 40,3 млн pull requests, доля PR с участием ИИ–агентов выросла с 1,1% в феврале 2024 года до 14,9% в ноябре 2025 года. Лидерами по количеству обработанных PR являются CodeRabbit (632 256 PR), GitHub Copilot (561 382 PR) и Google Gemini (174 766 PR) [14, 15].

Тем не менее, исследование Jellyfish (2025), охватившее 1 000 код–ревью в 400 компаниях, выявило значительный разрыв между использованием и реальным влиянием: разработчики отвечали лишь на 56% рецензий агентов, и только 18% привели к фактическим изменениям в коде. Большинство команд (75%) находятся в фазе экспериментирования и еще не перешли к стабильному использованию.[16]

5.2. Архитектура систем код–ревью

Современные MAC для код–ревью, такие как Graphite Diamond и CodeRabbit, интегрируются в CI/CD–конвейеры с минимальным уровнем ложных срабатываний (менее 5%). Типичная архитектура включает специализированных агентов: агент качества кода (обнаружение code smells и антипаттернов), агент безопасности (сканирование на уязвимости), агент производительности (анализ алгоритмической сложности), агент архитектуры (проверка соответствия паттернам проектирования) и агент–координатор.

Согласно отчету Qodo AI Code Quality Report (2025), 44% респондентов, считающих, что ИИ снижает качество кода, указывают на недостаточный контекст, а 53% даже среди сторонников ИИ хотели бы более глубокого контекстного понимания. Это подчеркивает критическую роль RAG–компонентов для обеспечения контекстного ревью [17].

6. Автоматизированное документирование кода

6.1. Метрики оценки: BLEU и BERTScore

Для оценки качества автоматически генерируемой документации используются два ключевых метрических подхода. BLEU (Bilingual Evaluation Understudy) измеряет n–граммное совпадение между сгенерированным и эталонным текстами, применяя clipped precision и brevity penalty для коротких генераций. BERTScore использует контекстуальные эмбеддинги из моделей BERT/RoBERTa/DeBERTa и оценивает семантическое сходство, что делает его менее чувствительным к перефразированию, но более ресурсоемким.

6.2. Эмпирические исследования

GPT–3 / Codex (2022). Исследование «Automatic Code Documentation Generation Using GPT–3» (arXiv:2209.02235) применило Codex для генерации документации на шести языках программирования (Python, Java, PHP, Go,

JavaScript, Ruby) с использованием датасета CodeSearchNet. В режиме one–shot Codex достиг среднего BLEU = 20,63, превысив предыдущего лидера CoTexT (18,55) на 11,2%. По отдельным языкам лучшие результаты зафиксированы для PHP (25,13) и Java (22,81), хотя в Java модель REDCODER (22,95) с внешним поиском из Stack Overflow оказалась незначительно лучше [8].

ReadmeReady (2024). Работа «Free and Customizable Code Documentation with LLMs: A Fine–Tuning Approach» (arXiv:2412.00726) представила open–source инструмент ReadmeReady для генерации README–файлов с поддержкой как платных (GPT–3.5/4), так и бесплатных моделей (Llama2, CodeLlama, Gemma). Применение QLoRA для дообучения на 12 803 примерах показало средний BLEU ≈ 23 и BERTScore F1 ≈ 88% для GPT, и ≈ 16 и ≈ 85% для дообученных open–source моделей. Снижение BLEU после дообучения объясняется сильной квантизацией и низким рангом адаптации из–за ограничений памяти GPU [9].

Таблица 2 – Описание моделей

Модель / Подход	BLEU	BERTScore F1, %	Метод	Источник
Codex (one–shot)	20,63	–	Zero/One–shot	arXiv:2209.02235 [8]
ReadmeReady (GPT)	~23	~88	RAG + промпт	arXiv:2412.00726 [9]
ReadmeReady (QLoRA)	~16	~85	Fine–tuning QLoRA	arXiv:2412.00726 [9]
CoTexT (baseline)	18,55	–	Fine–tuning	arXiv:2209.02235 [8]

7. Визуальное тестирование интерфейсов

7.1. Подходы на основе DOM и скриншотов

Традиционный подход к визуальному тестированию основан на DOM–сравнении: инструменты Applitools, Percy (BrowserStack) и Wopee.io сравнивают скриншоты текущего состояния интерфейса с эталонными. Applitools применяет Visual AI, имитирующий человеческое восприятие (учет шрифтов, цветов, макета, значимости изменений), а не пиксельное сравнение. Percy ориентирован на интеграцию в CI/CD через Git, поддерживая визуальный diff–алгоритм. Wopee.io использует метрики SSIM (Structural Similarity Index Measure) и Pixelmatch [7].

Общим ограничением данных инструментов является то, что они не генерируют действия в интерфейсе, а лишь верифицируют визуальный результат, требуя внешнего тестового движка (Selenium, Cypress) [20].

7.2. Визуальные агенты на основе компьютерного зрения

Альтернативный подход – визуальные AI–агенты, взаимодействующие с интерфейсом через анализ скриншотов, а не через DOM. Процесс включает пять этапов: (1) захват и предобработка изображения; (2) обнаружение и классификация UI–элементов (YOLO, Faster R–CNN, OCR); (3) сопоставление с намерением (intent mapping); (4) выполнение действия через OS API; (5) обратная связь и адаптация [20].

Данный подход устраняет хрупкость XPath/CSS–селекторов, однако вносит собственные ограничения: зависимость от разрешения и качества изображений, сложности с динамическими элементами (hover–эффекты, всплывающие подсказки) и потребность в ресурсоемком дообучении при смене дизайн–системы [20].

7.3. AUITestAgent: автоматизация функционального тестирования GUI

Работа «AUITestAgent: Automatic Requirements Oriented GUI Function Testing» представляет первый полностью автоматизированный инструмент для функционального тестирования GUI мобильных приложений Android на основе естественно–языковых требований. Система использует CV–модель vision–ui (разработка Meituan) для восприятия экрана, MLLM GPT–4o для верификации и Android Debug Bridge для выполнения действий [19].

Результаты сравнения на 30 тестовых сценариях в 8 приложениях.

Таблица 3 – Сравнения

Метрика	AUITestAgent	MobileAgent	AppAgent
Task Completion (TC)	77%	50%	40%
Correct Step (CS)	94%	60%	49%
Correct Trace (CT)	93%	74%	70%
Step Efficiency (SE)	99%	90%	84%

В промышленной практике Meituan (RQ3) за 10 регрессионных циклов (~2 месяца) AUITestAgent обнаружил 4 новых функциональных бага и сэкономил 1,5 человеко–дня на каждый регрессионный прогон [19].

Модуль верификации AUITestAgent демонстрирует Oracle Accuracy 95% (корректное поведение) и 85% (аномалии), Point Accuracy 97%/91% при False Positive Rate 4,5% – значительно превосходя базовый метод на основе многоходового диалога с GPT–4o (Oracle Accuracy 90%/30%) [19].

7.4. WebProber: тестирование веб–сайтов на основе VLM

Система WebProber (Ye et al., 2025, arXiv:2509.05197) использует визуальные языковые модели (VLM, Claude–3.7 Sonnet) для автономного тестирования веб–сайтов без предварительно заданных сценариев. На датасете из 120 академических персональных сайтов обнаружено 29 подтвержденных

юзабилити–багов (битые ссылки, логические несоответствия, текстовые ошибки) [13].

Существенным ограничением является 85% ложных срабатываний, низкое покрытие глубоких страниц при однократном проходе и отсутствие поддержки сложных SPA с динамическим рендерингом. Тем не менее, практическая значимость заключается в способности выявлять «человеческие» баги, которые пропускают традиционные инструменты, ориентированные на покрытие кода.

7.5. RL – подход к визуальному тестированию

Работа Mughal (2025, arXiv:2503.08464) предлагает альтернативный подход – интеграцию агентов на основе Reinforcement Learning (RL) в Behavior–Driven Development (BDD). Веб–приложение моделируется как «лабиринт», где агент обучается навигации от точки входа к целевому состоянию, используя Deep Q–Networks и Policy Gradient. Успешные траектории автоматически транслируются в BDD–сценарии (формат Gherkin) для CI/CD–совместимости [12].

Данная работа носит методологический характер (эмпирические результаты не приведены), однако демонстрирует важный тренд: объединение адаптивности RL с интерпретируемостью BDD для динамичных приложений с частыми изменениями UI.

8. Обсуждение

8.1. Выявленные тенденции

Проведенный анализ позволяет выделить несколько ключевых тенденций.

- **Переход от монолитных инструментов к специализированным агентным системам.** Наблюдается устойчивое движение от универсальных решений к MAC, где каждый агент оптимизирован для конкретной задачи (ревью, тестирование, документирование). Данный переход ускоряется доступностью фреймворков оркестрации (LangGraph) и снижением стоимости LLM–инференса [29].
- **Превосходство гибридных подходов.** Все проанализированные сравнительные исследования в области генерации тестов сходятся в том, что комбинация LLM и классических генераторов (EvoSuite, Pynguin) превосходит каждый метод по отдельности [4, 11].
- **Рост доли ИИ в код–ревью.** 14–кратное увеличение участия ИИ–агентов в PR с начала 2024 по конец 2025 года свидетельствует о структурном сдвиге в практиках код–ревью [28].
- **Развитие визуальных агентов.** Агенты на основе компьютерного зрения (AUITestAgent, WebProber) демонстрируют способность обнаруживать баги, недоступные традиционным инструментам. По прогнозу Gartner, к 2028 году 33% enterprise–приложений будут включать агентный ИИ [13, 19].

8.2. Противоречия между исследованиями

Основное противоречие касается роли RAG в генерации тестов: одни исследования демонстрируют снижение эффективности при использовании человеческих примеров, тогда как ReadmeReady и подобные системы успешно применяют RAG для документирования. Это указывает на зависимость эффективности RAG от типа задачи и степени соответствия стиля извлекаемых примеров стилю LLM–генерации [9].

8.3. Нерешенные вопросы и пробелы

- **Отсутствие стандартизированных бенчмарков** для комплексной оценки MAC в SDLC: существующие метрики (покрытие, BLEU, BERTScore) адресуют отдельные аспекты, но не позволяют оценить систему в целом.
- **Безопасность проприетарного кода:** работа агентов с конфиденциальным кодом через внешние API создает значительные риски, особенно в регулируемых отраслях [31].
- **Проблема галлюцинаций:** нестабильность результатов LLM и генерация «правдоподобного, но неверного» кода остается фундаментальным ограничением [4, 11].
- **Ограниченность воспроизводимых промышленных исследований:** большинство результатов получены на академических бенчмарках; лишь единичные работы (AUITestAgent в Meituan, GitAuto) приводят данные из реальной промышленной эксплуатации [19, 27].

9. Заключение

Систематический анализ более 60 источников позволяет сформулировать следующие обобщения.

1. Мультиагентные системы ИИ представляют зрелую технологическую парадигму для автоматизации ключевых этапов SDLC: код–ревью, генерации тестов, документирования и визуального тестирования. Доказательная база включает как академические исследования с воспроизводимыми метриками, так и индустриальные кейсы внедрения.
2. Оптимальной стратегией генерации тестов является гибридный подход, сочетающий LLM–агентов (для генерации читаемых, высокоуровневых тестов) с классическими инструментами (EvoSuite, Pynguin – для проработки граничных случаев и достижения высокого покрытия ветвлений).
3. Архитектура MAC должна определяться спецификой задачи: централизованная – для предсказуемых CI/CD–конвейеров, иерархическая – для комплексных проектов, декентрализованная – для распределенных систем. LangGraph является наиболее зрелым фреймворком для графовой оркестрации.

4. Визуальные агенты на основе компьютерного зрения (AUITestAgent, WebProber) открывают новый класс тестирования, недоступный традиционным инструментам, однако требуют значительных вычислительных ресурсов и дообучения.

Практические рекомендации для технических команд:

- начинать внедрение MAC с автоматизации код–ревью как наиболее зрелой и быстро окупающейся области;
- использовать гибридные стратегии тестирования, интегрируя LLM–агенты в существующие CI/CD–пайплайны;
- обеспечивать контекстную специализацию агентов через RAG с базами знаний, адаптированными под стиль и стандарты конкретного проекта;
- предусматривать механизмы аудита, версионирования промптов и отката для обеспечения надежности.

Список литературы:

1. AI coding agents : a comprehensive evaluation for 2025 [Электронный ресурс] // Propel Code blog. – 1 Jun. 2025. – URL: https://www.propelcode.ai/blog/ai-coding-agents-comprehensive-evaluation-2025 (accessed: 02.04.2026).
2. Что такое мультиагентные системы? [Электронный ресурс] // SAP Central Asia & Caucasus – Ресурсы. – 2025. – URL: https://www.sap.com/central-asia-caucasus/resources/what-are-multi-agent-systems (дата обращения: 02.04.2026).
3. Software development life cycle (SDLC) [Электронный ресурс] // GeeksforGeeks. – 2026. – URL: https://www.geeksforgeeks.org/software-engineering/software-development-life-cycle-sdlc/ (дата обращения: 02.04.2026).
4. Alshahwan, N. A System for Automated Unit Test Generation Using Large Language Models and Assessment of Generated Test Suites / N. Alshahwan et al. // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2408.07846. – 18 с.
5. Bhatia S., Gandhi T., Kumar D., Jalote P. Unit test generation using generative AI: a comparative performance analysis of autogeneration tools // Proceedings of the 1st International Workshop on Large Language Models for Code (LLM4Code @ ICSE 2024). – Lisbon, Portugal, 20 April 2024. – New York : ACM, 2024. – P. 54–61. DOI: 10.1145/3643795.3648396
6. Rasheed, Z. LLM–Based Multi–Agent Systems for Software Engineering: Literature Review, Vision and the Road Ahead / Z. Rasheed et al. // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2404.04834. – 38 с.
7. AI Testing Agents: Revolution or Just Another Tech Hype? [Электронный ресурс] / Wopee.io. – 2024. – URL: https://wopee.io/blog/ai-testing-agents/ (дата обращения: 19.12.2024).
8. Guilherme, M. Automatic Code Documentation Generation Using GPT–3 / M. Guilherme // arXiv preprint. – 2022. – arXiv:2209.02235. – 12 с.
9. Free and Customizable Code Documentation with LLMs: A Fine–Tuning Approach // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2412.00726. – 16 с.
10. Выбираем векторную БД для AI–агентов и RAG: большой обзор баз данных и поиск смысла [Электронный ресурс] // Хабр. – 2025. – URL: https://habr.com/ru/articles/961088/ (дата обращения: 29.10.2025).

11. Schäfer M., Nadi S., Eghbali A., Tip F. An Empirical Evaluation of Using Large Language Models for Automated Unit Test Generation // IEEE Transactions on Software Engineering. – 2024. – Vol. 50, No. 1. – P. 85–105. DOI: 10.1109/TSE.2023.3334955
12. Mughal A. An Autonomous RL Agent Methodology for Dynamic Web UI Testing in a BDD Framework // arXiv preprint. – 2025. – arXiv:2503.08464. DOI: 10.48550/arXiv.2503.08464
13. Ye N, Yu X., Xu R, AI Agents for Web Testing: A Case Study in the Wild // arXiv preprint. – 2025. – arXiv:2509.05197. – 12 с. DOI: 10.20944/preprints202508.1890.v1
14. Hasan M. M., Li H., Fallahzadeh E., Rajbahadur G. K., Adams B., Hassan A. E. An Empirical Study of Testing Practices in Open Source AI Agent Frameworks and Agentic Applications // Empirical Software Engineering. – 2026. – Vol. 31, No. 5. DOI: 10.1007/s10664-026-10857-9.
15. Yang Y., Chai H., Shao S., Song Y., Qi S., Rui R., Zhang W. AgentNet: Decentralized Evolutionary Coordination for LLM-Based Multi-Agent Systems // arXiv preprint. – 2025. – arXiv:2504.00587.
16. The Real Impact of AI Code Review Agents [Электронный ресурс] / Jellyfish. – 2025. – URL: https://jellyfish.co/blog/impact-of-ai-code-review-agents/ (дата обращения: 05.09.2025).
17. Best Automated Code Review Tools 2026: Qodo AI Code Quality Report, 2025 [Электронный ресурс] / Qodo. – 2025. – URL: https://www.qodo.ai/blog/best-automated-code-review-tools-2026/ (дата обращения: 15.12.2025).
18. Guo T., Chen X., Wang Y., Chang R., Pei S., Chawla N. V., Wiest O., Zhang X. Large Language Model based Multi-Agents: A Survey of Progress and Challenges // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2402.01680.
19. Hu Y., Wang X., Wang Y., Zhang Y., Guo S., Chen C., Wang X., Zhou Y. AUITestAgent: Automatic Requirements Oriented GUI Function Testing // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2407.09018.
20. Vision AI UI Testing [Электронный ресурс] / AskUI. – 2024. – URL: https://www.askui.com/blog-posts/visual-testing-with-ai (дата обращения: 03.07.2025).
21. LangGraph: Agent Orchestration Framework [Электронный ресурс] / LangChain. – 2025. – URL: https://www.langchain.com/langgraph (дата обращения: 15.01.2026).
22. AI Agents in Software Testing [Электронный ресурс] / testRigor. – 2024. – URL: https://testrigor.com/ai–agents–in–software–testing/. (дата обращения: 15.01.2026).
23. Li J., Grover A., Alpuerto A., Cao Y., Liu X.-Y. Orchestration Framework for Financial Agents: From Algorithmic Trading to Agentic Trading // arXiv preprint. – 2025. – arXiv:2512.02227.
24. Wang J., Duan Z. Agent AI with LangGraph: A Modular Framework for Enhancing Machine Translation Using Large Language Models // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2412.03801.
25. How we built our multi–agent research system [Электронный ресурс] / Anthropic. – 2024. – URL: https://yandex.ru/search?clid=1906725&text=How+we+built+our+multi–agent+research+system+%5BЭлектронный+ресурс%5D+%2F+Anthropic.+–+2024&lr=194 (дата обращения: 13.06.2025)
26. Ouedraogo W. C., Kabore K., Tian H., Song Y., Koyuncu A., Klein J., Lo D., Bissyandé T. F. LLMs and Prompting for Unit Test Generation: A Large-Scale Evaluation // Proceedings of the 39th ACM/IEEE International Conference on Automated Software Engineering (ASE 2024). – New York : ACM, 2024. – P. 2464–2465. DOI: 10.1145/3691620.3695330

27. GitAuto: Automated Integration Test Generation [Электронный ресурс]. – 2024. – https://gitauto.ai/ (дата обращения: 13.06.2025).
28. Pullflow. State of AI Code Review 2025 [Электронный ресурс] / Pullflow. – 2025. – URL: https://www.pullflow.com/state-of-ai-code-review-2025 (дата обращения: 13.06.2025).
29. Tang Y., Runkler T. LLM–Based Agentic Systems for Software Engineering: Challenges and Opportunities // arXiv preprint. – 2026. – arXiv:2601.09822.
30. Technical Documentation Specialist AI Agents [Электронный ресурс] / Relevance AI. – 2024. – URL: https://relevanceai.com (дата обращения: 13.06.2025).
31. AL–Maamari A. Can You Trust Your Copilot? A Privacy Scorecard for AI Coding Assistants // arXiv preprint. – 2025. – arXiv:2509.20388.

УДК 658.51

Коняев Е. С., Жданов В. А.
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия

ПАРАДИГМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОГО И АГЕНТНОГО ПОДХОДОВ

Аннотация. В статье проводится систематический сравнительный анализ двух ключевых парадигм имитационного моделирования дискретных производственных систем – дискретно-событийного (DES) и агентного (ABM) моделирования. Детально рассмотрены возможности и ограничения каждого подхода применительно к типовым производственным задачам: анализу пропускной способности, моделированию адаптивного поведения операторов и диспетчеров, управлению запасами. Показано, что DES эффективен при фиксированных правилах поведения и высокой вычислительной нагрузке, тогда как ABM незаменим при исследовании стохастических поведенческих эффектов. Предложена таблица критериев для обоснованного выбора методологии в зависимости от характеристик системы и исследовательского вопроса.

Ключевые слова: имитационное моделирование, дискретно-событийное моделирование, агентное моделирование, производственные системы, выбор методологии.

Введение

Выбор методологии имитационного моделирования является одним из ключевых решений при анализе дискретных производственных систем. Аналитические методы – теория массового обслуживания, математическое программирование – накладывают жесткие ограничения, основанные на предположениях, которые редко выполняются в реальных условиях [1, 2], что делает имитационное моделирование предпочтительным инструментом. Дискретно-событийное моделирование (DES) исторически закрепилось как ведущая парадигма в производственной тематике: высокая вычислительная эффективность, богатый аппарат статистического анализа и естественное соответствие «заказ – транзакт», «операция – узел обслуживания», «оборудование – ресурс» обеспечили его широкое распространение [3, с. 24].

Агентное моделирование (ABM), ориентированное на автономные взаимодействующие сущности, предлагает принципиально иную перспективу: глобальное поведение системы возникает «снизу вверх» из локальных взаимодействий агентов, что позволяет захватить адаптивные и эмерджентные эффекты, недоступные DES [4, 5]. Вопрос о том, когда применять каждый из

подходов – а когда их объединять – остается дискуссионным и практически значимым [6].

Цель настоящей статьи – провести систематический сравнительный анализ DES и ABM в контексте производственных задач, выявить сферы эффективного применения каждой парадигмы и предложить структурированные критерии методологического выбора.

Парадигмы имитационного моделирования: сравнительный анализ

Дискретно-событийное моделирование: возможности и ограничения

DES основан на представлении системы как последовательности событий, происходящих в дискретные моменты модельного времени; между событиями состояние системы остается неизменным [3]. Это позволяет пропускать пустые временные интервалы и обеспечивает высокую вычислительную эффективность по сравнению с пошаговыми методами. DES естественно отображает производственные процессы: соответствие «заказ – транзакт», «операция – узел обслуживания», «оборудование – ресурс» почти взаимно однозначно [7], что сокращает разрыв между концептуальной моделью предметного эксперта и ее формальным представлением. Стандартный аппарат накопления статистики автоматически формирует гистограммы, временны́е ряды незавершенного производства и распределения коэффициентов утилизации.

Систематические ограничения DES сводятся к трем: во-первых, ресурсы представлены агрегированно – невозможно отразить различия в квалификации операторов или зависимость вероятности отказа от истории обслуживания оборудования [4]; во-вторых, поведение «активных» участников процесса – операторов, диспетчеров – фиксируется статически заданными правилами без динамической адаптации к состоянию системы. В-третьих, информационные потоки между участниками (оперативное перераспределение приоритетов, сообщения о задержках) трудно отобразить без выхода за рамки парадигмы [7].

Агентное моделирование: возможности и ограничения

Агент в ABM – автономная сущность с внутренним состоянием, набором правил поведения и способностью взаимодействовать с окружением и другими агентами [5, 8]. Глобальное поведение системы возникает «снизу вверх» из локальных взаимодействий – это явление, называемое эмерджентностью, является отличительным свойством ABM [9]. В производственных приложениях агентами выступают операторы, диспетчеры, а в более сложных моделях – и единицы оборудования с программируемыми политиками технического обслуживания.

Оператор как агент описывается квалификацией (множитель скорости обработки), уровнем утомления (функция времени с начала смены) и системой приоритетов (правило выбора заказа из очереди) [10, 11]. Диспетчер как агент динамически адаптирует пороги запуска заказов и стратегии перераспределения потоков на основе наблюдаемого состояния системы – в отличие от статических

правил DES. Такой подход позволяет, в частности, моделировать снижение производительности во второй половине смены или эффект переключения на срочный заказ с учетом времени переналадки.

Главные ограничения ABM – высокая требовательность к данным и вычислительная сложность. Параметры поведенческих правил (скорость нарастания утомления, чувствительность к приоритетам) как правило недоступны из стандартных ERP/MES-журналов и требуют специальных исследований – опросов, наблюдений, экспертных оценок [4]. Для модели с N взаимодействующими агентами наивная реализация дает сложность $O(N^2)$ на каждом шаге, а большие модели (свыше тысячи агентов) практически нереализуемы без распараллеливания [12]. Верификация эмерджентных эффектов нетривиальна: причинно-следственная цепь от локальных правил к глобальному результату не всегда очевидна, что затрудняет валидацию модели [13].

Таким образом, выбор имитационной модели для того или иного производства зависит от условий, в которых оперирует предприятие – ключевыми критериями в таком случае выступают число операций, вариативность маршрутов, требования к детализации поведения операторов, объему доступных данных, их структурной сложности для разработки и обработки, временному горизонту и фокусу анализа, что отражено в таблице 1.

Таблица 1 – Критерии выбора методологии имитационного моделирования

Характеристика	DES	ABM	Гибридный
Число операций	5-20	свыше 50	свыше 20
Вариативность маршрутов	низкая	высокая	высокая
Поведение операторов	фиксированное	адаптивное	смешанное
Требования к данным	средние	высокие	средние
Сложность разработки	средняя	высокая	высокая
Вычислительные затраты	низкие	высокие	средние
Временной горизонт	дни / недели	часы / дни	дни / месяцы
Фокус анализа	пропускная способность	поведение агентов	интегрированная политика

Заключение

Проведенный сравнительный анализ показывает, что дискретно-событийное и агентное моделирование обладают принципиально различными областями применения, обусловленными архитектурными особенностями каждой парадигмы. DES остается оптимальным выбором для задач, в центре которых находятся вопросы пропускной способности, загрузки оборудования и балансировки производственной линии – при условии, что поведение операторов может быть адекватно описано статическими правилами. ABM целесообразен тогда, когда адаптивность агентов, индивидуальные различия операторов или динамика принятия решений диспетчером определяют исход производственного процесса.

Предложенная таблица критериев позволяет структурировать методологический выбор по ключевым характеристикам системы: числу операций, вариативности маршрутов, требованиям к детализации поведения, объему доступных данных и временному горизонту. Для систем, в которых значимы оба вида характеристик одновременно, логичным развитием является гибридный подход, объединяющий преимущества обеих парадигм, однако требующий более высокой квалификации разработчика и дополнительных усилий на верификацию и валидацию [14, 15].

Список литературы:

1. Строгалев В.П., Толкачева И.О. Имитационное моделирование. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 295 с. ISBN: 978-5-7038-4825-8 EDN: DARZTY
2. Карпов Ю. Г. Имитационное моделирование систем : введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю. Г. Карпов. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2009. – 390 с. : ил. + CD-ROM. ISBN 978-5-94157-148-2.
3. Banks J. Discrete-Event System Simulation. – 5th ed. – Prentice Hall, 2010. – 622 p.
4. Borshchev A. The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic. – AnyLogic North America, 2013. – 612 p.
5. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems. – 2nd ed. – Chichester: Wiley, 2009. – 484 p.
6. Law A.M. Simulation Modeling and Analysis. – 6th ed. – New York: McGraw-Hill, 2024. – 688 p.
7. Robinson S. Simulation: The Practice of Model Development and Use. – 2nd ed. – London: Palgrave Macmillan, 2014. – 392 p. DOI: 10.1007/978-1-137-32803-8
8. Macal C.M., North M.J. Tutorial on agent-based modelling and simulation // Journal of Simulation. – 2010. – Vol. 4, № 3. – P. 151-162. DOI: 10.1057/jos.2010.3
9. Bonabeau E. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2002. – Vol. 99, suppl. 3. – P. 7280-7287. DOI: 10.1073/pnas.082080899
10. Elkosantini S., Gien D. Integration of human behavioural aspects in a dynamic model for a manufacturing system // International Journal of Production Research. – 2009. – Vol. 47, No. 10. – P. 2601–2623. – DOI: https://doi.org/10.1080/00207540701663490.

11. Greasley A., Owen C. Modelling people's behaviour using discrete-event simulation: a review // International Journal of Operations & Production Management. – 2018. – Vol. 38, № 5. – P. 1228-1244. DOI: 10.1108/IJOPM-10-2016-0604

12. Siebers P.O., Macal C.M., Garnett J., Buxton D., Pidd M. Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation! // Journal of Simulation. – 2010. – Vol. 4, № 3. – P. 204-210. DOI: 10.1057/jos.2010.14

13. Sargent R.G. Verification and validation of simulation models // Journal of Simulation. – 2013. – Vol. 7, № 1. – P. 1224. DOI: 10.1057/jos.2012.20

14. Brailsford S.C., Eldabi T., Kunc M., Mustafee N., Osorio A.F. Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review // European Journal of Operational Research. – 2019. – Vol. 278, № 3. – P. 721-737. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.10.025 EDN: KDTNYO

15. Eldabi T., Brailsford S., Djanatliev A. et al. Hybrid simulation challenges and opportunities: a life-cycle approach // Proceedings of the 2019 Winter Simulation Conference. – National Harbor, 2019. – P. 1500-1514. DOI: 10.1109/WSC.2018.8632465

УДК 624.131.4:552.52

Рогов И. А.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

ВЛИЯНИЕ ТЕКСТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СУГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА НА АНИЗОТРОПИЮ ИХ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ

Аннотация. В статье рассмотрена связь между текстурным строением суглинистых грунтов и характером их прочностной анизотропии на примере двух различных отложений Санкт-Петербурга. Объектами исследования служили ленточный суглинок с регулярным ритмичным чередованием слоёв разного гранулометрического состава и слоистый суглинок, отличающийся отсутствием выраженного чередования слоёв при преимущественно горизонтальной ориентации глинистых частиц. На основе испытаний методом одноплоскостного среза вдоль и поперёк напластования определено, что ленточный суглинок обладает анизотропией как угла внутреннего трения, так и удельного сцепления, тогда как у слоистого суглинка анизотропию проявляет исключительно по удельное сцепление. Сделан вывод о том, что определяющим фактором является не сама слоистость, а её регулярность и неоднородность гранулометрического состава смежных слоёв.
Ключевые слова: прочностная анизотропия, ленточный суглинок, слоистый суглинок, угол внутреннего трения, удельное сцепление, текстура грунта, одноплоскостной срез.

Введение

Проектирование оснований и фундаментов в условиях слоистых глинистых отложений сопряжено с необходимостью корректного учёта пространственной изменчивости прочностных характеристик грунта. Особую роль здесь играет прочностная анизотропия – зависимость параметров сопротивления сдвигу от ориентации плоскости разрушения относительно структурных элементов грунтового массива [1, 2]. Как показывают многочисленные исследования, игнорирование этого явления при расчёте устойчивости откосов и несущей способности свайных фундаментов может приводить к существенным погрешностям [3].

Природа прочностной анизотропии глинистых грунтов определяется их текстурой – пространственной ориентировкой частиц и агрегатов, слоистостью, наличием ослабленных межслоевых контактов [2]. Особый интерес с этой точки зрения представляют озёрно-ледниковые ленточные суглинки, широко распространённые на Северо-Западе России, в том числе в Санкт-Петербурге [4, 5]. Их ритмичная текстура, обусловленная сезонным

характером осадконакопления в приледниковых водоёмах, создаёт принципиально иные условия сдвига вдоль и поперёк напластования [6].

Зарубежные исследования подтверждают, что ленточные глины относятся к числу наиболее выраженных анизотропных грунтов: в работе [7] по результатам трёхосных испытаний образцов с различной ориентацией напластования показано, что прочность при срезе под углом 45° к слоям минимальна, а при ориентации 90° – максимальна. Аналогичная закономерность зафиксирована и для ленточных глин других регионов [8]. Вместе с тем вопрос о том, в какой мере подобная анизотропия характерна для суглинков с менее контрастной, нерегулярной слоистостью, остаётся малоизученным.

На территории Санкт-Петербурга наряду с ленточными суглинками распространены слоистые суглинки иного генезиса, у которых ритмичное чередование слоёв отсутствует, а глинистые частицы преимущественно ориентированы горизонтально. Сравнительное изучение прочностной анизотропии этих двух типов грунтов позволяет установить, какие именно текстурные признаки определяют характер и степень анизотропии, что имеет как научное, так и прикладное значение для геотехнической практики региона [4].

Целью настоящей работы является экспериментальное сравнение прочностных характеристик ленточного и слоистого суглинков при срезе вдоль и поперёк напластования и выявление зависимости характера анизотропии от текстурных особенностей грунта.

Методика проведения испытания и результаты

Для проведения лабораторных испытаний на территории Санкт-Петербурга были отобраны образцы суглинка с разным характером слоистости: ленточный суглинок с ярко выраженным чередованием слоёв разного гранулометрического состава, текстура которого представлена на рисунке 1, и слоистый суглинок, текстурные особенности которого характеризуются отсутствием в сравнении с ленточным грунтом чередования слоёв и преимущественной ориентацией глинистых частиц в пространстве вдоль линии горизонта.

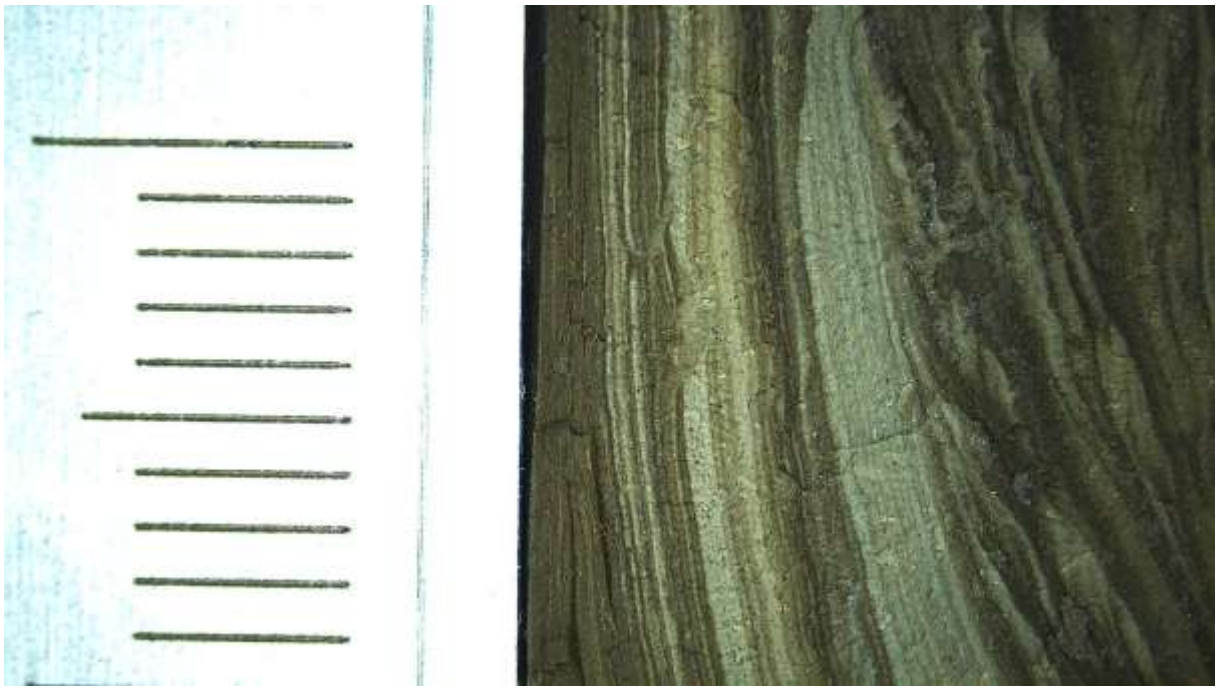


Рисунок 1. Текстура ленточного суглинка

Прочностные характеристики грунтов оценивались по средствам проведения испытания на одноплоскостной срез в соответствии с рекомендациями [9] и приборах автоматизированного испытательного комплекса «АСИС» производства ООО «НПП Геотек».

Образцы грунта вырезались из монолитов вдоль и поперёк направления слоистости, после чего загружались в прибор и уплотнялись на протяжении 16 часов, затем производился срез.

Рисунок 2. Загруженный прибор одноплоскостного среза

Предварительно определялись такие физические характеристики грунтов, как природная влажность W, показатель текучести I_L, число пластичности I_p в соответствии с [10]. Все определённые физические характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физические характеристики испытываемых грунтов

№	Наименование грунта	W, д.ед.	I_L, д.ед.	I_p, д.ед.
1	Суглинок ленточный мягкопластичный	0,30	0,64	0,16
2	Суглинок слоистый мягкопластичный	0,31	0,61	0,15

Результаты определения угла внутреннего трения для ленточного и слоистого грунта вдоль и поперёк линии напластования приведены на рисунке 3.

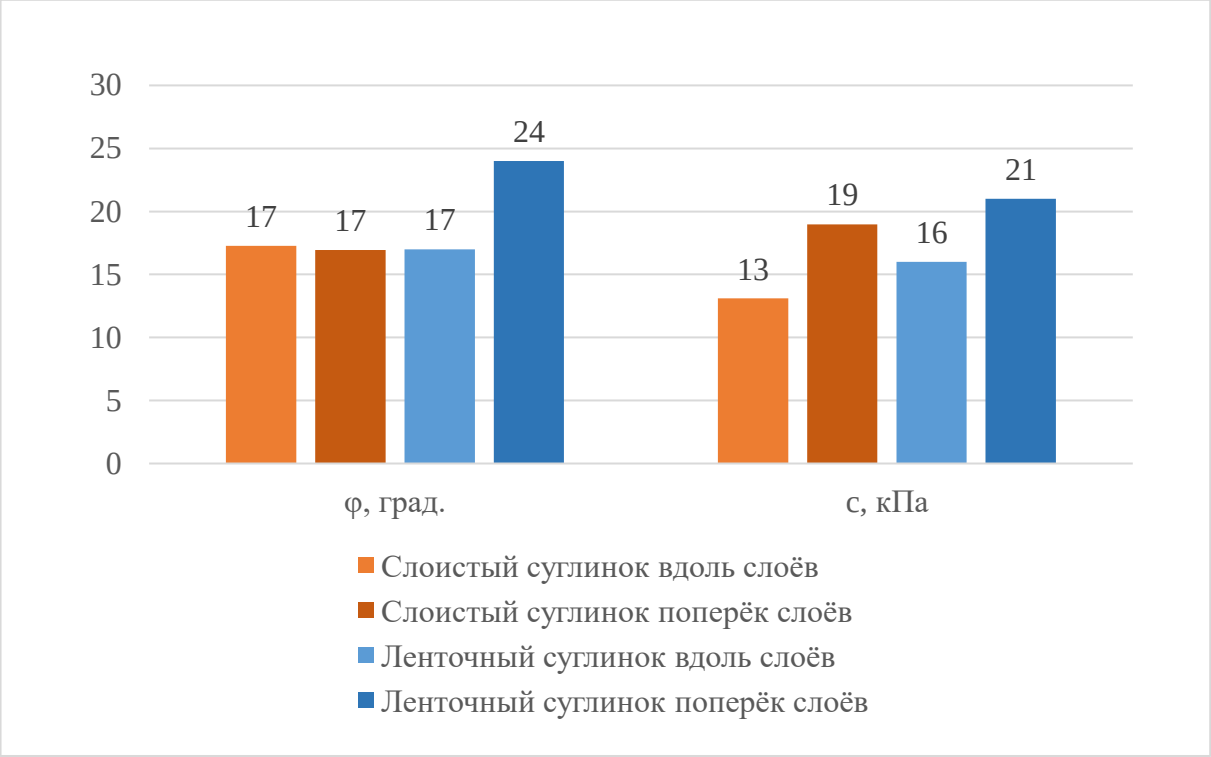


Рис. 3 Прочностные характеристики испытанных грунтов

Из него следует, что у двух исследованных типов грунтов принципиально различный характер прочностной анизотропии. Для ленточного суглинка угол внутреннего трения при срезе поперёк слоёв составил 24°, при срезе вдоль – 17°, что соответствует коэффициенту анизотропии $K_{a\,\varphi} = 1{,}41$. Удельное сцепление возросло с 16 кПа при срезе вдоль до 21 кПа при срезе поперёк, коэффициент анизотропии $K_{a\,c} = 1{,}31$. Таким

образом, ленточный суглинок обладает выраженной анизотропией обоих прочностных характеристик.

Слоистый суглинок ведёт себя принципиально иначе. Угол внутреннего трения в обоих направлениях составляет 17°, то есть трения частиц в грунте носит изотропный характер. Анизотропия проявляется исключительно у удельного сцепления: 13 кПа вдоль слоёв против 19 кПа поперёк. Следовательно, у слоистого суглинка наличие анизотропии обусловлено только удельным сцеплением.

Выводы и обсуждение

Выявленные закономерности объясняются текстурными особенностями грунтов. В ленточном суглинке ритмичное чередование пылеватых и глинистых слоёв формирует разные контакты между слоями: при срезе вдоль напластования разрушение проходит по ослабленным границам раздела слоёв, что снижает как трение, так и сцепление. При ориентации среза поперёк слоёв плоскость разрушения пересекает чередующиеся слои, и среднее сопротивление закономерно возрастает по обоим прочностным характеристикам [1, 7]. Именно регулярность и гранулометрическая неоднородность разных слоёв обусловливает полную анизотропию прочности ленточного суглинка.

В слоистом суглинке отсутствует ритмичное чередование слоёв, что обеспечивает структурную однородность грунтового скелета, вследствие чего трение частиц одинаково в любом направлении. Анизотропия сцепления обусловлена преимущественно горизонтальной ориентацией глинистых частиц, которая создаёт более высокое структурное сцепление в направлении поперёк их ориентировки, но не влияет на трение между частицами [2, 8].

Важно отметить, что максимальные значения угла внутреннего трения у ленточного суглинка при срезе поперёк напластования превышают соответствующий показатель слоистого суглинка. Это подтверждает, что упорядоченная ритмичная микроструктура ленточного грунта при пересечении слоёв обеспечивает более высокое механическое зацепление частиц, которое отсутствует в структурно-однородном слоистом суглинке.

Полученные результаты позволяют сформулировать практически значимый вывод: тип слоистости грунта является признаком, позволяющим прогнозировать характер прочностной анизотропии ещё на стадии инженерно-геологических изысканий. При выявлении ленточной текстуры необходимо учитывать анизотропию обоих прочностных параметров, тогда как при менее выраженной слоистости допускается принимать угол трения изотропным, однако определение сцепления в соответствии с направлением остаётся обязательным [3, 4].

Таким образом, определяющим фактором прочностной анизотропии является не слоистость грунта как таковая, а степень её регулярности и гранулометрической неоднородности.

Список литературы:

1. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.
2. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов: (напряженно-деформативные и прочностные характеристики). – Москва : Стройиздат, 1979. – 304 с.
3. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Оценка влияния анизотропии свойств грунтов на устойчивость склонов // Инженерные изыскания. – 2013. – № 9. – С. 44–50. EDN: RCDKHP
4. Улицкий В. М., Шашкин А. Г., Шашкин К. Г. Геотехническое сопровождение развития городов: (практическое пособие по проектированию зданий и подземных сооружений в условиях плотной застройки). – Санкт-Петербург : Стройиздат Северо-Запад : Группа компаний «Георекконструкция», 2010. – 551 с. – (Серия «Достижения современной геотехники» ; 3). – ISBN 978-5-91956-020-3.
5. Дашко Р. Е., Каган А. А. Механика грунтов в инженерно-геологической практике. – Москва : Недра, 1977. – 237 с.
6. Николаева, М. В. История формирования озерно-ледниковых отложений Санкт-Петербурга / М. В. Николаева. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2022. – № 44 (439). – С. 293-295. – URL: https://moluch.ru/archive/439/96066,
7. Tankiewicz M. Experimental investigation of strength anisotropy of varved clay // Procedia Earth and Planetary Science. – 2015. – Vol. 15. – P. 732–737. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.116
8. Ghadr S., Assadi-Langroudi A. Effect of inherent anisotropy on the behavior of fine-grained cohesive soils // International Journal of Civil Engineering. – 2019. – Vol. 17. – P. 687–697.
9. ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза. – М.: Стандартинформ, 2020. – 20 с.
10. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – М.: Стандартинформ, 2019. – 23 с.

УДК 556.048+556.06

Сергеев С. С.
Сибирский федеральный университет, Саяно-Шушенский филиал, Черемушки, Россия

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИТОКА РЕКИ К СТВОРУ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС ПО ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ТУВЫ

Аннотация. В статье рассматривается задача краткосрочного прогнозирования суточного притока реки Енисей к створу Саяно–Шушенской ГЭС на основе оперативной гидрологической информации Республики Тыва. Цель исследования состоит в построении интерпретируемой регрессионной модели, пригодной для ежедневного диспетчерского применения. В качестве исходных факторов использованы расход воды в створе г. Кызыл, оценка боковой приточности и расчетный показатель осадков. По данным безледоставного периода 2016–2020 гг. сопоставлены линейная и квадратичные модели. Итоговая модель показала коэффициент детерминации R^2 = 0,944 и среднеквадратическую ошибку около 230,6 м³/с. Предложен порядок применения модели в составе водно–энергетического расчета СШГЭС.

Ключевые слова: Саяно–Шушенская ГЭС, краткосрочный прогноз, приток воды, регрессионная модель, гидрологическая информация, Республика Тыва, водно–энергетический режим, диспетчерское управление.

Введение

Саяно–Шушенская ГЭС является одним из ключевых гидроэнергетических объектов Енисейского бассейна. Надежность ее эксплуатации зависит не только от технического состояния оборудования и гидротехнических сооружений, но и от качества прогнозной гидрологической информации. При изменении притока к створу гидроузла диспетчерская служба должна своевременно корректировать расходы через гидроагрегаты и водосбросы, контролировать уровень верхнего бьефа и обеспечивать выполнение требований водопользователей и энергосистемы [1; 2].

Особую практическую значимость имеет краткосрочный прогноз притока с заблаговременностью 1–2 суток. Именно этот горизонт используется при ежедневном уточнении водно–энергетического режима, при оценке допустимых скоростей наполнения водохранилища, а также при выборе состава работающих гидроагрегатов. В отличие от долгосрочных прогнозов, краткосрочный расчет должен опираться на оперативные данные наблюдений: уровни и расходы воды на постах, текущую боковую приточность, осадки и температурный фон.

Бассейн формирования притока к СШГЭС имеет сложные природные условия. Верховья Енисея расположены в горной части Республики Тыва, где осадки распределяются неравномерно, а весенний и раннелетний сток

существенно зависит от высотного снеготаяния. Основной контрольный створ выше СШГЭС – г. Кызыл – интегрирует влияние Большого и Малого Енисея и формирует опережающий сигнал для прогноза притока к водохранилищу. При этом на участке от Кызыла до плотины сохраняется значимая боковая приточность, связанная, в частности, с реками Хемчик, Ус и Кантегир [6].

Цель статьи – представить результаты разработки и проверки регрессионной модели краткосрочного прогнозирования суточного притока к створу СШГЭС по оперативной гидрологической информации Тувы, а также показать возможность ее применения в водно–энергетических расчетах станции.

Исходные данные и выбор факторов

В качестве расчетной базы использованы суточные наблюдения безледоставного периода за 26.04.2016–25.10.2020. Исключение зимнего периода связано с тем, что в условиях ледовых явлений возрастает доля пропусков, условных отметок и погрешностей гидрометрических измерений. Для построения регрессионных зависимостей отобраны строки, где все входные показатели представлены числовыми значениями.

Целевой переменной является суточный приток к створу СШГЭС Qпр, м³/с. Набор объясняющих переменных сформирован с учетом физики формирования стока и практической доступности данных для оперативного расчета. В модель включены расход воды в створе г. Кызыл на 08:00, оценка боковой приточности и расчетный показатель осадков над бассейном. Такой набор факторов удобен для производственного применения: он не требует ресурсоемкой гидродинамической модели, но отражает основные источники изменения притока.

Таблица 1. Факторы, использованные при построении краткосрочной модели прогноза

Обозначение	**Содержание показателя**	**Гидрологический смысл**	**Использование в модели**
QКызыл	расход воды в створе г. Кызыл, м³/с	интегральный показатель стока Большого и Малого Енисея	линейный и квадратичный член
Qбок	оценка боковой приточности, м³/с	учет притоков на участке Кызыл – СШГЭС	линейный и квадратичный член
P	расчетный показатель осадков	характеристика дождевого подпитания и увлажнения бассейна	линейный и квадратичный член

Для учета нелинейности зависимости «расход – приток» дополнительно сформированы квадратичные признаки QКызыл², Qбок² и P². Использование квадратичных членов обосновано тем, что при повышенной водности и интенсивных осадках реакция бассейна может усиливаться непропорционально линейному изменению исходных факторов. Такой подход сохраняет интерпретируемость модели и одновременно позволяет лучше описывать периоды паводочного роста.

Построение и сравнение регрессионных моделей

Расчет коэффициентов выполнен методом наименьших квадратов. Для оценки влияния нелинейности рассмотрены три варианта: линейная модель A, квадратичная по расходам модель B и итоговая квадратичная модель C, дополнительно учитывающая нелинейное влияние осадков. В качестве критериев качества использованы коэффициент детерминации R^2, средняя абсолютная ошибка MAE и среднеквадратическая ошибка RMSE.

Таблица 2. Сравнение точности регрессионных моделей на обучающей выборке

Модель	Факторы	R^2	MAE, м³/с	RMSE, м³/с
A	QКызыл, Qбок, P	0,941	173,6	235,1
B	QКызыл, QКызыл², Qбок, Qбок², P	0,943	168,0	231,1
C	QКызыл, QКызыл², Qбок, Qбок², P, P²	0,944	168,1	230,6

Сравнение моделей показывает, что переход от линейной зависимости к квадратичной улучшает качество аппроксимации: RMSE снижается с 235,1 до 230,6 м³/с, а R^2 увеличивается с 0,941 до 0,944. Различия между моделями B и C невелики, однако модель C демонстрирует наилучшее значение R^2 и RMSE, поэтому она выбрана в качестве рекомендуемой для практического применения.

Итоговая модель имеет следующий вид:

$$Qпр = -182{,}348 + 1{,}19827 \cdot QКызыл - 4{,}02342 \cdot 10^{-5} \cdot QКызыл^2 + 4{,}07081 \cdot Qбок - 0{,}002437 \cdot Qбок^2 + 0{,}09223 \cdot P + 0{,}000362109 \cdot P^2,$$

где Qпр – прогнозируемый суточный приток к створу СШГЭС, м³/с; QКызыл – расход воды в створе г. Кызыл, м³/с; Qбок – боковая приточность, м³/с; P – расчетный показатель осадков. Данная формула является основным прикладным результатом исследования и может быть реализована в ежедневной расчетной таблице диспетчерской службы.

Проверка устойчивости модели

Для оценки воспроизводимости результата выполнена проверка на условно независимом периоде: наблюдения 2016–2019 гг. использованы для обучения, а данные 2020 г. – для контроля. Такой подход позволяет проверить, не является ли высокая точность следствием подгонки под весь ряд наблюдений.

Таблица 3. Проверка устойчивости моделей при обучении на 2016–2019 гг. и контроле на 2020 г.

Модель	R^2 обуч.	MAE обуч.	RMSE обуч.	R^2 контр.	MAE контр.	RMSE контр.
A	0,944	175,0	236,6	0,900	179,5	257,4
B	0,946	170,4	232,5	0,912	167,6	240,7
C	0,947	170,1	231,8	0,917	169,5	234,0

На контрольном периоде итоговая модель C сохраняет высокий уровень объясненной дисперсии: $R^2 = 0,917$, RMSE = 234,0 м³/с. Это подтверждает возможность ее использования в оперативных расчетах при условии регулярного контроля ошибки. В то же время результат не устраняет необходимость инженерной проверки прогноза, особенно при резком изменении метеорологической обстановки, дождевых паводках и активном снеготаянии.

Применение модели в водно–энергетическом расчете СШГЭС

Практическая ценность модели определяется тем, что прогноз притока может быть включен в ежедневный водно–энергетический расчет. На основании прогнозного значения Qпр определяется изменение объема водохранилища, ожидаемый уровень верхнего бьефа, возможные расходы через гидроагрегаты и прогнозная выработка электроэнергии. Базовая логика расчета соответствует уравнению водного баланса:

$V_{кон} = V_{нач} + V_{прит} – V_{ГЭС}$,

где $V_{кон}$ – объем водохранилища на конец расчетного интервала; $V_{нач}$ – объем на начало суток; $V_{прит}$ – объем поступившего притока; $V_{ГЭС}$ – объем воды, пропущенной через гидроузел. Объем притока рассчитывается по формуле $V_{прит} = Q_{пр} \cdot T/10^9$, где T – число секунд в сутках.

В оперативной практике целесообразно применять не только точечный прогноз, но и интервальную оценку. В качестве масштаба ошибки можно использовать RMSE итоговой модели, то есть $\sigma \approx 230$ м³/с. Тогда для диспетчерского анализа формируются три варианта: средний $Q_{пр,мод}$, нижний $Q_{пр,мод} – \sigma$ и верхний $Q_{пр,мод} + \sigma$. Верхняя граница используется

при признаках высокого паводка, нижняя – при устойчивой маловодной ситуации, средняя – для планового режима.

При использовании модели следует учитывать ограничения верхнего и нижнего бьефов, допустимые скорости наполнения водохранилища, готовность гидроагрегатов, ограничения выдачи мощности и требования водопользователей [3; 4]. Поэтому регрессионный прогноз не заменяет диспетчерское решение, а является расчетным блоком, позволяющим повысить обоснованность ежедневной корректировки режима.

Таблица 4. Рекомендуемый порядок использования модели в эксплуатации СШГЭС

Этап	Содержание действия	Периодичность
1	Сбор фактических данных QКызыл, Qбок и Р, контроль уровней на ключевых постах	ежедневно, после поступления бюллетеня
2	Расчет Qпр по итоговой регрессионной формуле и формирование интервала Qпр ± σ	ежедневно
3	Корректировка прогноза по ошибке предыдущих суток при наличии устойчивого смещения	ежедневно или по необходимости
4	Передача прогноза в водно–энергетический расчет уровня, расходов и выработки	ежедневно
5	Сравнение прогноза с фактом и ведение журнала ошибок	ежедневно
6	Переоценка коэффициентов модели при накоплении новых данных	не реже одного раза в год после окончания безледоставного периода
7	Расширение обучающей выборки и проверка на независимых годах разной водности	ежегодно, при актуализации модели

Существенным условием надежного применения модели является регулярное наращивание обучающей последовательности. После завершения каждого безледоставного периода целесообразно добавлять новые наблюдения, повторно рассчитывать коэффициенты, сравнивать качество старой и новой версий модели и оставлять в эксплуатации тот вариант, который обеспечивает меньшую ошибку на контрольных периодах. При появлении новых автоматизированных источников данных модель может быть расширена за счет температурных показателей, уровней Тоора–Хема и Сарыг–Сепа, а также детализированных осадков по метеопостам бассейна.

Заключение

В результате исследования построена и проверена регрессионная модель краткосрочного прогнозирования суточного притока р. Енисей к створу Саяно–Шушенской ГЭС на основе оперативной гидрологической информации Республики Тыва. Научная новизна работы состоит в том, что для условий бассейна выше СШГЭС предложена интерпретируемая квадратичная модель, связывающая прогнозируемый приток с расходом воды в створе г. Кызыл, боковой приточностью и расчетным показателем осадков.

Практически значимым результатом является рекомендуемая формула прогноза $Q_{пр} = -182{,}348 + 1{,}19827 \cdot Q_{Кызыл} - 4{,}02342 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{Кызыл}^2 + 4{,}07081 \cdot Q_{бок} - 0{,}002437 \cdot Q_{бок}^2 + 0{,}09223 \cdot P + 0{,}000362109 \cdot P^2$. Она может быть реализована в MS Excel или другой расчетной среде и использоваться при ежедневном планировании режима СШГЭС на горизонте 1–2 суток.

Сравнение вариантов показало, что учет квадратичных членов повышает точность по сравнению с линейной моделью. Итоговая модель обеспечивает $R^2 = 0{,}944$ на общей обучающей выборке и $R^2 = 0{,}917$ на контрольном периоде 2020 г.; среднеквадратическая ошибка находится на уровне 230–234 м³/с. Для эксплуатационного применения это означает возможность использовать модель как независимую расчетную оценку притока и как инструмент уточнения диапазона официальных прогнозов.

Для применения в работе СШГЭС рекомендуется ежедневно рассчитывать прогноз после поступления оперативных данных на 08:00, вести журнал фактических и прогнозных значений, использовать интервальную оценку $Q_{пр} \pm \sigma$ при сценарном планировании, а также ежегодно актуализировать коэффициенты после завершения безледоставного периода. Такой порядок позволит наращивать обучающую выборку, контролировать устойчивость модели и повышать качество краткосрочного водно–энергетического планирования.

Список литературы:

1. Приказ Минприроды России от 26.01.2011 № 17 «Об утверждении Методических указаний по разработке правил использования водохранилищ» // Справочно-правовая система «Гарант». – URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2074575/ (дата обращения: 10.05.2026).

2. Приказ Минприроды России от 30.11.2007 № 314 «Об утверждении Методики расчета водохозяйственных балансов водных объектов» [Электронный ресурс] // СПС «Гарант». – URL: https://base.garant.ru/2163817/ (дата обращения: 06.06.2026).

3. СТО РусГидро 06.01.84-2013 «Гидроэлектростанции. Планирование водноэнергетических режимов. Методические указания» [Электронный ресурс]. – URL: https://volgaltd.ru/images/standart/078_sto-rusgidro-06_01_84-2013_planirovanie-vodnoenergeticheskih-rezhimov.pdf (дата обращения: 06.06.2026).

4. СТО РусГидро 06.01.99-2013 «Гидроэлектростанции. Методические указания по учету стока воды»[Электронный ресурс]. –

URL: https://storage.yandexcloud.net/storage.rushydro.ru/iblock/80f/80f6a58663a0875e79ac0b16d2d04664/097_STO-RusGidro-06.01.99-2013_MU-po-uchetu-stoka-vodi.pdf (дата обращения: 06.06.2026).

5. Брызгалов В.И., Гордон Л.А. Гидроэлектростанции: учебное пособие. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. 541 с. ISBN 5-7636-0437-7

6. Корытный Л. М. Реки Красноярского края. – Красноярск : Книжное издательство, 1991. – 155, [2] с., [4] л. ил. ISBN 5-7479-0271-7

7. Филиппова Т. А., Мисриханов М. Ш., Сидоркин Ю. М., Русина А. Г. Гидроэнергетика. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2013. – 620 с. – ISBN 978-5-7782-2209-0. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система Znanium. – URL: https://znanium.com/catalog/product/557101 (дата обращения: 07.06.2026).

УДК 621.9.025

Беккер Б. Н.
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ВЫСОКОМАРГАНЦЕВЫХ СТАЛЕЙ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАСТИН НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА СО ВСТАВКОЙ ИЗ ТВЕРДОГО СПЛАВА

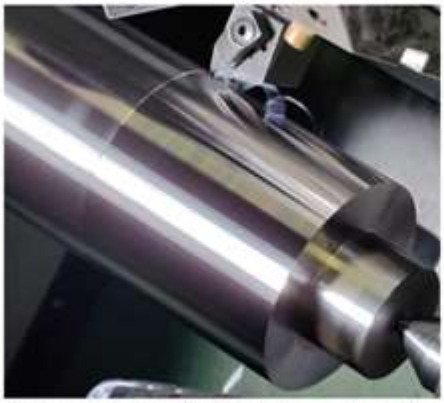
Аннотация. В данной статье раскрываются особенности технологического процесса создания режущего инструмента на основе кубического нитрида бора, получаемого методом пайки слоя КНБ и подложки из твердого сплава. Рассмотрены конструктивные особенности пластин типа фул-фэйс, физико-механические свойства кубического нитрида бора, а также роль подложки-демпфера в снижении вибраций при резании. Приведены результаты стойкостных испытаний при токарной обработке с ударом высокомарганцевой стали 125Г18Х2Л без охлаждения.

Ключевые слова: технологический процесс, режущий инструмент, кубический нитрид бора, пайка, подложка из твердого сплава, высокомарганцевая сталь, стойкостные испытания, токарная обработка с ударом.

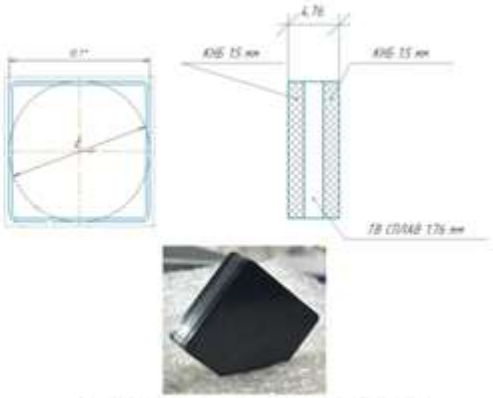
Введение

Современное машиностроение предъявляет все более высокие требования к точности и производительности механической обработки. Особую сложность представляет обработка высокомарганцевых сталей типа 125Г18Х2Л, обладающих эффектом наклепа: их твердость возрастает непосредственно в процессе резания, что существенно ускоряет износ инструмента [2]. В связи с этим широкое применение в промышленности получают режущие инструменты на основе кубического нитрида бора (КНБ), обладающие уникальным сочетанием твердости, износостойкости и термической стабильности.

Перспективным направлением является использование пластин из КНБ типа фул-фэйс, получаемых методом пайки слоя поликристаллического КНБ и подложки из твердого сплава. Такая конструкция позволяет одновременно использовать высокую износостойкость КНБ и демпфирующие свойства подложки, снижающей вибрации при прерывистом резании [3]. Внешний вид пластины представлен на рисунке 1.



Процесс токарной обработки закаленной стали ШХ15 твердостью 60 HRC пластиной из кнб Full-Face



Эскиз пластины и готовое изделие

Рисунок 1 – Пластина из КНБ фул-фэйс (режущая пластина SNGN120412T02020N-E015)

1. Свойства кубического нитрида бора и область его применения

Кубический нитрид бора (КНБ) является синтетическим сверхтвердым материалом, занимающим второе место по твердости после алмаза. Его твердость по шкале Виккерса составляет 40 000–50 000 МПа, что значительно превышает показатели твердых сплавов (12 000–18 000 МПа). Принципиальным отличием КНБ от алмаза является его химическая инертность по отношению к железу при высоких температурах, что делает его незаменимым при обработке черных металлов [4].

Термическая стабильность КНБ сохраняется до температур 1000–1200 °С в окислительной атмосфере. Теплопроводность КНБ составляет 100–200 Вт/(м·К), что обеспечивает эффективный отвод теплоты из зоны резания и препятствует перегреву режущей кромки [6]. Исследования в области применения адаптивных покрытий подтверждают, что инструменты с оптимизированными характеристиками поверхностного слоя обеспечивают существенный прирост производительности [1].

Основными областями применения режущих инструментов из КНБ являются:

- чистовая и получистовая токарная обработка закаленных и высокопрочных сталей;
- обработка серых и отбеленных чугунов;
- обработка твердых наплавок и термически напыленных покрытий;
- обработка деталей из высокомарганцевых сталей с эффектом наклепа.

2. Конструктивные особенности пластин КНБ типа фул-фэйс, получаемых методом пайки

Пластины КНБ фул-фэйс представляют собой конструкцию, в которой слой поликристаллического КНБ соединен с подложкой из твердого сплава методом высокотемпературной пайки. В отличие от технологии спекания под высоким давлением, пайка позволяет соединять заготовки КНБ и твердого сплава, предварительно вырезанные в форму готовой пластины, что обеспечивает гибкость в производстве различных геометрий инструмента [5].

Подложка из твердого сплава (марки ВК6 или WC-Co с 6–10% кобальта) выполняет функцию демпфера, поглощающего вибрации при прерывистом резании. Влияние конструктивных особенностей режущего инструмента на его стойкость рассмотрено в работе [3], где показано, что жесткость системы инструмент–заготовка определяет интенсивность ударных нагрузок на режущую кромку.

3. Технологический цикл изготовления пластин КНБ методом пайки

Технологический цикл изготовления пластин КНБ фул-фэйс методом пайки включает три основных этапа.

На первом этапе выполняется отрезка заготовок. Из синтезированного блока поликристаллического КНБ и листовой заготовки из твердого сплава методом электроэрозионной обработки (ЭЭО) вырезаются заготовки требуемой формы и размера. ЭЭО является единственным эффективным методом разрезки сверхтвердых материалов [5].

На втором этапе производится пайка заготовок. Заготовки КНБ и твердого сплава собираются в пакет с прослойкой припоя (активные припои на основе серебра с добавками титана или циркония). Пайка осуществляется в вакуумной печи при температурах 750–900 °С [6].

На третьем этапе выполняется шлифовка напаянных элементов. Биметаллические заготовки подвергаются плоскому шлифованию алмазными кругами для обеспечения точности геометрических параметров пластины в соответствии с нормами ISO 1832. Технологический цикл изготовления пластины представлен на рисунке 3.

Рисунок 3 – Технологический цикл изготовления пластины КНБ методом пайки: отрезка заготовок – пайка – шлифовка

4. Методика и условия стойкостных испытаний

Стойкостные испытания проводились на токарном станке с ЧПУ в условиях действующего производства. В качестве обрабатываемого материала использовалась высокомарганцевая сталь 125Г18Х2Л твердостью 25–35 HRC, обладающая выраженным эффектом деформационного наклепа. Обработка производилась в режиме токарной обработки с ударом без применения СОЖ [2].

В испытаниях сравнивались два инструмента: пластина Microbor SNGN120412T02020N-E015-MBR7010M на основе КНБ (отечественный производитель) и пластина зарубежного производителя SNGN120412T02020 CBN. Режимы резания приведены в таблицах 1 и 2. Критерием затупления служила величина износа по задней поверхности VB = 0,3 мм (стандарт ISO 3685).

Таблица 1 – Режимы резания: пластина MBR SNGN120412T02020N-E015-MBR7010M

Режимы резания	Значение
Fn	0,3 мм/об
Vc	35 м/мин
Ap	3–6 мм

Таблица 2 – Режимы резания: пластина зарубежного производителя SNGN120412T02020 CBN

Режимы резания	**Значение**
Fn	0,2 мм/об
Vc	25 м/мин
Ap	3–6 мм

Рисунок 4 – Условия испытаний: обработка высокомарганцевой стали 125Г18Х2Л пластиной из КНБ

5. Результаты испытаний и их анализ

В результате проведенных испытаний установлено, что пластина MBR на основе КНБ обеспечила стойкость при режимах Vc = 35 м/мин, Fn = 0,3 мм/об, Ap = 3–6 мм, что соответствует более высокой производительности обработки по сравнению с зарубежным аналогом (Vc = 25 м/мин, Fn = 0,2 мм/об). Скорость резания и подача для отечественной пластины оказались выше на 40% и 50% соответственно, что подтверждает выводы работы [1] о высоком потенциале отечественных инструментальных материалов.

Анализ характера износа показал преобладание абразивного износа по задней поверхности, обусловленного высокой абразивностью наклепанного слоя стали 125Г18Х2Л. Адгезионный износ и сколы режущей кромки у пластины Microbor практически отсутствовали, что объясняется эффективным демпфированием ударных нагрузок паяной твердосплавной подложкой [3].

Измерение шероховатости обработанной поверхности показало стабильное значение Ra = 1,6–3,2 мкм на протяжении всего периода стойкости инструмента, что соответствует требованиям к черновой и получистовой обработке деталей из высокомарганцевых сталей [4]. Экономический эффект от применения пластины Microbor выражается в снижении совокупных затрат на инструмент на 30–40% [6].

Заключение

В работе проведено исследование эксплуатационных характеристик режущих пластин из кубического нитрида бора типа фул-фэйс, получаемых методом пайки слоя КНБ и твердосплавной подложки, при токарной обработке с ударом высокомарганцевой стали 125Г18Х2Л без охлаждения. Установлено, что паяная конструкция обеспечивает надежное демпфирование ударных нагрузок, предотвращая сколы режущей кромки. По результатам производственных испытаний подтверждено превосходство пластины Microbor над зарубежным аналогом по допустимым режимам резания: скорость резания выше на 40%, подача — на 50%.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения пластин КНБ фул-фэйс, получаемых методом пайки, для обработки деталей из высокомарганцевых сталей в условиях ударного нагружения. Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию состава припоя и режимов пайки с целью повышения прочности паяного соединения при циклических нагрузках.

Список литературы:

1. Григорьев С. Н., Волосова М. А., Мигранов М. Ш., Федоров С. В., Гусев А. С., Колосова Н. В. Диагностирование температурно-силовых условий лезвийной обработки деталей авиадвигателестроения инструментом с многослойными покрытиями // Вестник Московского авиационного института. – 2022. – Т. 29, № 4. – С. 231–242. DOI: 10.34759/vst-2022-4-231-242 EDN: PSGCNW

2. Вдовин К. Н., Феоктистов Н. А., Горленко Д. А., Никитенко О. А. Легирование и модифицирование высокомарганцевой стали. – Магнитогорск : Издательство Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, 2018. – 312 с. ISBN 978-5-9967-1097-3.

3. Иващенко А. П. Анализ и синтез причин, приводящих к снижению стойкости режущего инструмента при резании материалов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=11435.

4. Гартфельдер В. А., Секлетина Л. С., Янюшкин А. Р. Лезвийная обработка закалённых сталей инструментами из кубического нитрида бора // Системы. Методы. Технологии. – 2020. – № 1 (45). – С. 29–33. – DOI: 10.18324/2077-5415-2020-1-29-33 EDN: UJTUEN

5. Боровский Г. В., Григорьев С. Н., Маслов А. Р. Справочник инструментальщика. – 2-е изд., испр. – Москва : Машиностроение, 2007. – 463 с. ISBN 978-5-217-03389-8

6. Manokhin A. S., Klimenko S. A., Kopeikina M. Yu., Klimenko S. A., Roshchupkin V. V., Lyakhovitskii M. M. Tribology of cutting by tools equipped with cBN-based PSHM // Journal of Superhard Materials. – 2014. – Vol. 36, No. 2. – P. 124–135.

УДК 691.32:678

Копырина Е. А.
Научный руководитель: Кацурба М. В.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВ БЕТОНА ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ДОБАВОК

Аннотация. Использование полимерных пропиток, с целью покрытия бетонных конструкций, является одним из действенных способов, получения строительных оснований, материалов со значительными эксплуатационными характеристиками, при этом с минимальными транспортными затратами. Наибольшая часть затрат приходится на транспортировку компонентов в населенные пункты Республики Саха (Якутии). Поэтому в данной работе исследовались именно местные ресурсы для разработки состава строительного материала на основе бетона.

Ключевые слова: полимерные добавки, удельная поверхность, органосиликатная краска, органосиликатная краска, истираемость.

Актуальность

Использование полимерных пропиток, с целью покрытия бетонных конструкций, является одним из действенных способов, получения строительных оснований, материалов со значительными эксплуатационными характеристиками, при этом с минимальными финансовыми затратами. Наибольшая часть затрат приходится на транспортировку компонентов в населенные пункты Республики Саха (Якутии). Поэтому в данной работе исследовались именно местные ресурсы для разработки состава строительного материала на основе бетона.

Цель исследования

Исследование влияния модифицирующей добавки Амокор КМ и органосиликатной краски ОС-12-03Elcon на эксплуатационные характеристики бетона.

Задачи исследования

- Ознакомиться с полимерными добавками, используемыми для улучшения конструкционных материалов;
- Изготовить образцы из бетона М200 с использованием песка Кильдямского месторождения;
- Модифицировать изготовленные образцы;
- Провести испытания на прочность и истирание;
- Провести анализ полученных результатов.

Повышение эксплуатационных характеристик бетонов с использованием полимерных пропиток

Среди крупнейших потребителей полимерных материалов на одном из первых мест стоит строительная индустрия. Широкому применению полимерных материалов в строительстве способствуют не только высокая химическая стойкость, хорошие декоративные свойства многих из них, но и сравнительная простота применения, технологичность и другие свойства. Следует, однако, отметить, что на многих промышленных предприятиях в условиях сильного агрессивного воздействия повышенного давления и температуры термопластичные полимерные материалы быстро стареют, а не наполненные термореактивные, имея высокий коэффициент температурных деформаций, отслаиваются от защищаемых конструкций. Как показывает практика эксплуатации многих промышленных предприятий, защита строительных конструкций полимерными покрытиями малоэффективна и во многих случаях не обеспечивает не обходимой надежности и долговечности сооружений. В связи с этим в самых разнообразных отраслях промышленности все ощутимей сказывается отсутствие строительных материалов, которые сочетали бы высокую химическую стойкость с высокой прочностью и долговечностью.

Состав образцов

Для нашего бетона марки М200 в качестве вяжущего вещества выбирают портландцемент, а в качестве заполнителя горный песок Кильдямского месторождения. Цемент изготавливается АО ПО «Якутцемент» в поселке Мохсоголох.

Таблица 1 – Характеристика Портландцемента

Наименование	Удельная поверхность, м²/кг	Нормальная густота цементного теста, %	Сроки схватывания, ч	Прочность, М/Па, 7/28 суток
Портландцемент ЦЕМ | 32,5	340	26.5	1 ч – 5 ч 20 мин	29/37,4

Таблица 2 – Характеристика Горного песка

Вид песка	Насыпная плотность, кг/м³	Средняя плотность, кг/м³	Пустотность, %	Водопоглощение	Влажность, %
Оранжевый, слабо обожженный, светло-красный	1,025	2,23	52	8,7	0,87

Характеристика полимерной пропитки «Амокор КМ»

«Амокор КМ» представляет собой подвижную жидкость. При нанесении на поверхность бетона, кирпича и других пористых стройматериалов он проникает в их объем и отвердевает там, и образуется новый композитный строительный материал, обладающий набором ценных свойств.

Таблица 3 – Применение

Стоимость

Полимерная пропитка Амокор	Гидрофобизатор Аквасил	Полимерная пропитка Duraseal	Протексил	Элакор-ПУ Грунт 2К/100
480 руб/кг	400 руб/кг	1100 руб/литр	229 руб/кг	360 руб/кг

Характеристика органосиликатной краски ОС-12-03 Elcon

Органосиликатная краска ОС-12-03 Elcon предназначена для антикоррозионной защиты поверхностей, эксплуатируемых при температуре от −60 °С до +300 °С. При нанесении композиции на окрашиваемую поверхность значительно усиливаются морозостойкость и водонепроницаемость строительных материалов, при этом сохраняется их паропроницаемость, то есть поверхности «дышат», что значительно увеличивает срок эксплуатации зданий и сооружений.

Объекты и методы исследования

Объектами являются образцы бетона М200, изготовленные согласно ГОСТ № 27006-86. Всего было изготовлено 290 образцов.

- Состав бетона: Цемент -1 часть, Песок –3 части, Вода – 0,48 части.
- Образцы: Бетонная балка со стороной 4х4х16 см.
- Модификаторы: полимерная пропитка Амокор КМ и органосиликатная краска.
- Оборудование: комплекс из гидравлических прессов ИП 1250м авто ИП 250М, Климатическая камера холода, тепла и влаги КХТВ-3,0 Испытательная установка ЛКИ-3.

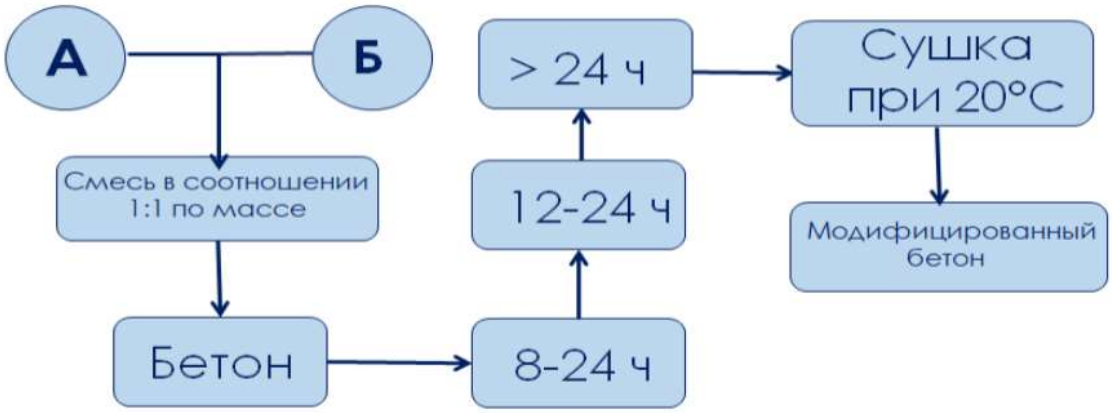


Рисунок 1 – Нанесение полимерного состава

Согласно ГОСТ-у №10060-2012 было выбрано по 6 образцов на каждые 10 циклов, 6 на 30 циклов и 6 на 50 циклов.

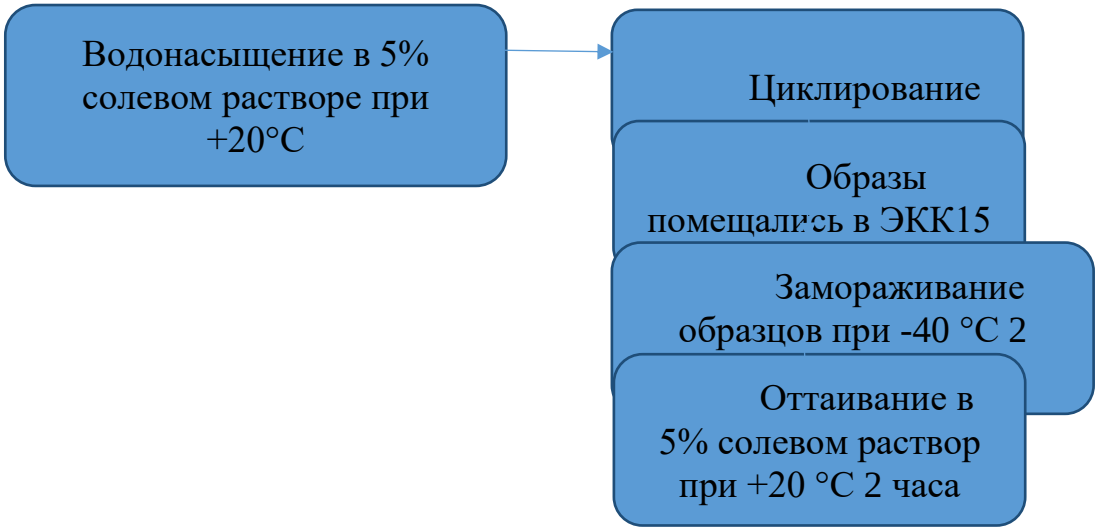


Рисунок 2 – Схема УКИ

Климатическая камера холода, тепла и влаги КХТВ-3,0, в которой образцы охлаждались до -600С.

Рисунок 3 – Климатическая камера холода, тепла и влаги КХТВ-3

Рисунок 4 – Климатический полигон СВФУ на 6 км Маганского тракта
Рисунок 5 – Климатический полигон СВФУ на 6 км Маганского тракта

Механические испытания

Испытания на сжатие и изгиб проводились на Комплексе из гидравлических прессов ИП 1250м в КТФ Республики Саха (Якутия). Образцы, обработанные краской, показывают результаты лучше, чем образцы, не обработанные краской (От 0,5% до 48%). Однако на прочность больше влияет добавка «Амокор», поскольку образцы, не обработанные ей показывают результаты хуже обработанных.

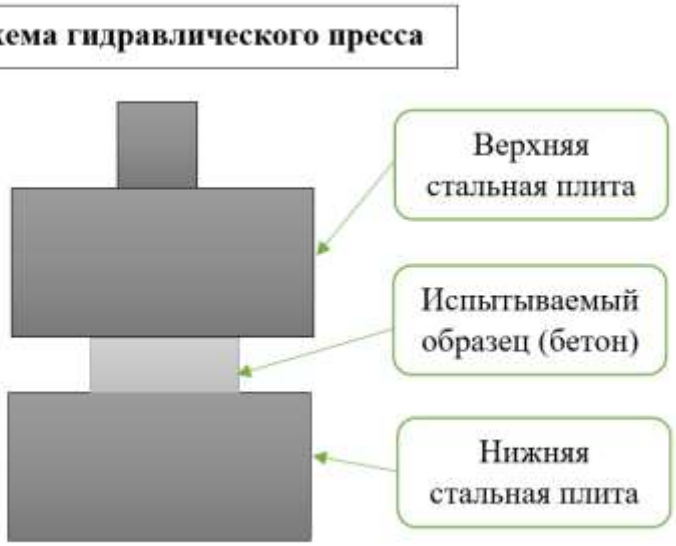


Рисунок 6 – Гидравлический пресс
Рисунок 7 – Схема Гидравлического пресса

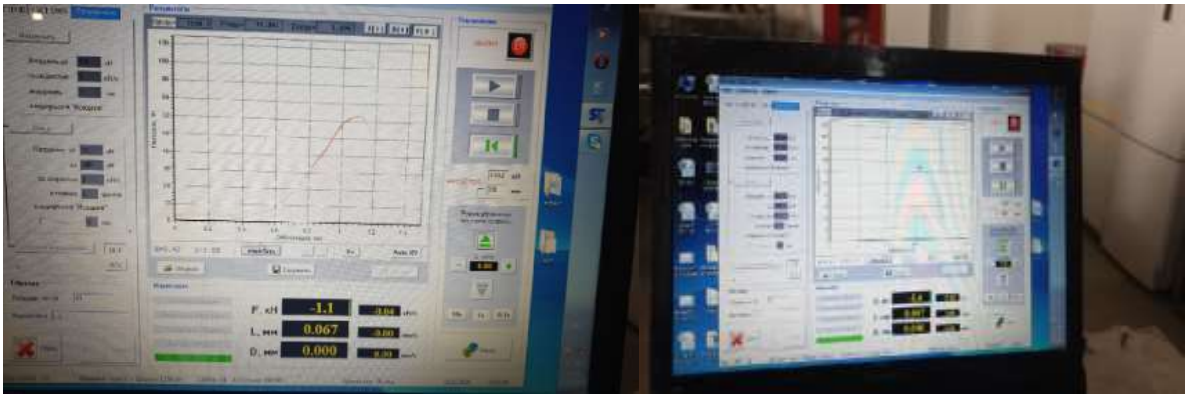


Рисунок 8 – Результаты образцов на изгиб
Рисунок 9 – Результаты образцов на изгиб

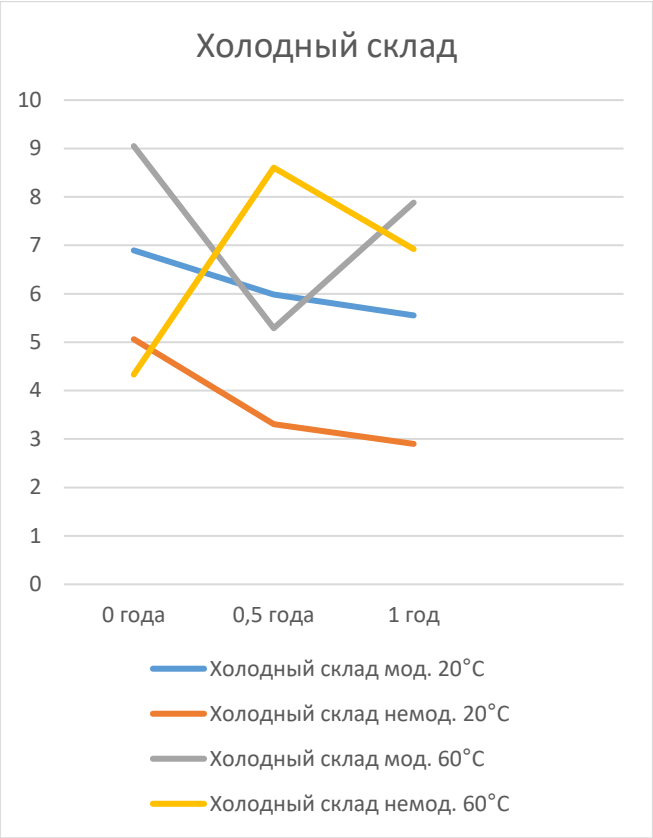


Рисунок 10 – Холодный склад

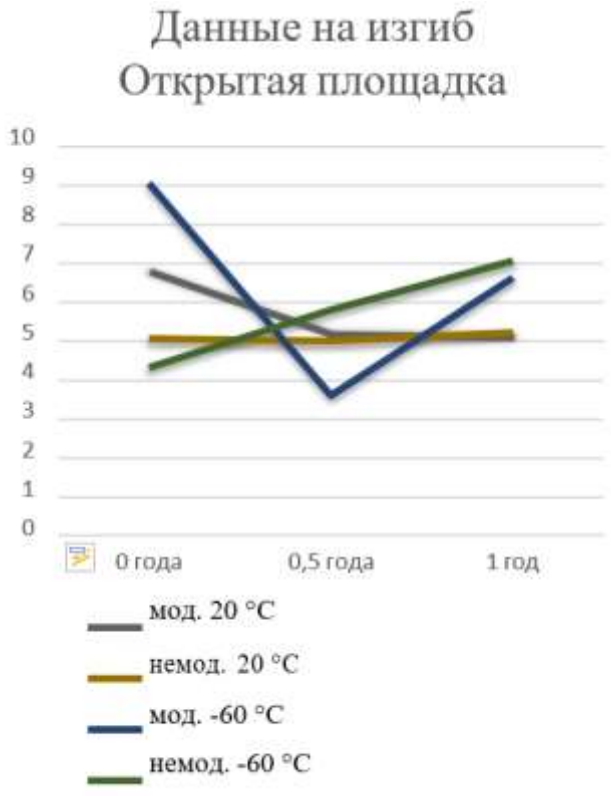


Рисунок 11 – Данные на изгиб

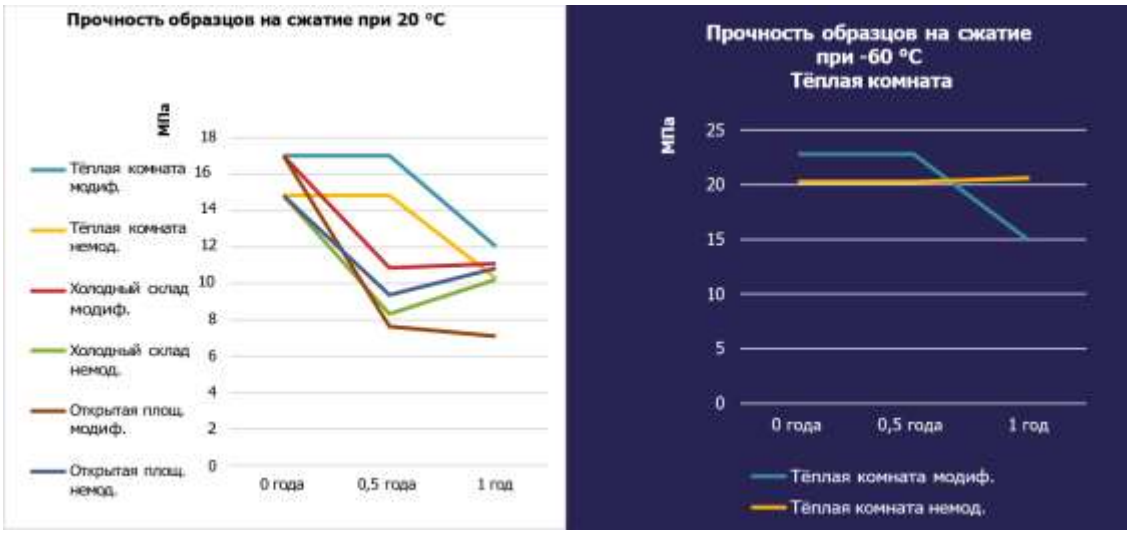


Рисунок 12 – Результаты образцов на сжатие

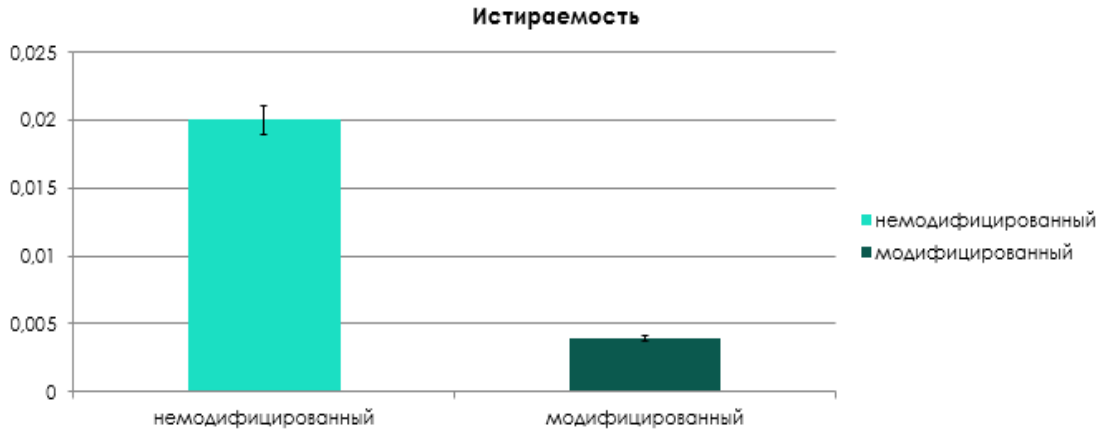


Рисунок 13 – Испытание на истирание

Образцы:

1. немодифицированные образцы;
2. модифицированные образцы;
3. модифицированные образцы (краска+Амокор) образцы при испытании на изгиб при +20. Открытая площадка.

Рисунок 14 – Образцы

Выводы

Исходная прочность на изгиб модифицированных образцов в сравнении с немодифицированными возрастает на 30%.

Исходная прочность на сжатие модифицированных образцов в сравнении с немодифицированными возрастает на 10-20%.

Истирание модифицированных образцов снижается в 5 раз в сравнении с немодифицированными.

В результате анализов было установлено, что модификация бетонного изделия добавкой «Амокор» частично растворяет хрупкие стекловидные выделения. Увеличились прочностные характеристики за счет увеличения плотности и пластичности.

Полимерная пропитка Амокор КМ и органосиликатная краска ОС-12-03Elcon повышают эксплуатационные свойства бетона и рекомендованы к применению в строительстве в условиях низких температур и повышенной влажности.

Список литературы:

1. Афанасьев Н. Ф., Целуйко М. К. Добавки в бетоны и растворы. – Киев : Будивэльнык, 1989. –127, [1] с. : ил. – ISBN 5-7705-0184-7.
2. Горбунов С. П. Оптимизация составов тяжелых бетонов применением тонкодисперсных добавок // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура». – 2012. – № 17 (276). – С. 30–35. EDN: OYDSYB
3. Уржумцев Ю. С., Филатов И. С. Физика и механика полимеров : учебное пособие / Якут. гос. ун-т. – Якутск : ЯГУ, 1989. –1 71, [1] с. : ил.
4. Санжаровский А. Т. Физико-механические свойства полимерных и лакокрасочных покрытий. – М. : Химия, 1978. – 183 с. : ил.
5. Материаловедение : методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов бакалавриата направлений 13.03.01, 15.03.01, 21.03.01, 23.03.03, 27.03.03 / Нац. минерально-сырьевой ун-т «Горный» ; сост.: А. В. Сивенков, Е. В. Шадриев, Т. П. Горшкова. – Санкт-Петербург : НМСУ «Горный», 2015. – 79, [2] с. : ил., табл.
6. Физические величины : справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1231, [1] с. : ил.
7. Алексеев А. Г., Барон Ю. М., Коротких М. Т. и др. Технология конструкционных материалов. Производство заготовок : учебник / под ред. М. М. Радкевича. – М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 516 с. – URL: https://znanium.ru/catalog/product/2100451 (дата обращения: 06.06.2026).
8. Малкин А. Я., Аскадский А. А., Коврига В. В. Методы измерения механических свойств полимеров. – М. : Химия, 1978. – 330 с. : ил.

Приложения

ГОСТ 30744–2001. Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка.

ГОСТ 10181–2000. Смеси бетонные. Методы испытаний.

ГОСТ 26633–2012. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия.

ГОСТ 8735–88. Песок для строительных работ. Методы испытаний.

ГОСТ 8736–93. Песок для строительных работ. Технические условия.

ГОСТ 8269.0–97. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.

ГОСТ 10060–2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости.

ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

ГОСТ 12730.1–78. Бетоны. Метод определения плотности.

ГОСТ 12730.3–78. Бетоны. Метод определения водопоглощения.

ГОСТ 13087–81. Бетоны. Методы определения истираемости.

ГОСТ 23732–2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия.

УДК 004.896:629.3

Скалинский Р. А.
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КЛАССИЧЕСКИХ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ ОБХОДА ПРЕПЯТСТВИЙ АВТОНОМНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ПЛАТФОРМОЙ

Аннотация. В статье рассматривается задача обхода препятствий автономной транспортной платформой. Сравниваются классические методы, которые основаны на заранее заданных правилах и математических моделях, и нейросетевые методы, которые обучаются по данным или через взаимодействие со средой. Основное внимание уделяется тому, какие методы удобнее применять на платформе с ограниченными датчиками и вычислительными ресурсами. Также рассматривается пример экспериментального сравнения, где нейросетевые модели имитационного обучения сопоставлялись с методом потенциальных полей на реальной мобильной платформе. По итогам сделан вывод, что на практике наиболее рациональным вариантом является гибридный подход. В таком случае классический алгоритм отвечает за безопасность движения, а нейросетевые методы помогают лучше воспринимать окружающую среду и реагировать на сложные ситуации.

Ключевые слова: автономная транспортная платформа, обход препятствий, мобильный робот, потенциальные поля, Dynamic Window Approach, нейронные сети, компьютерное зрение, обучение с подкреплением, машинное обучение.

Введение

Задача обнаружения и обхода препятствий является одной из основных задач при разработке алгоритмов движения автономной транспортной платформы. Платформа может быть хорошо продумана с точки зрения механики, иметь датчики и вычислительный модуль, но если она не может вовремя заметить препятствие и выбрать безопасное направление движения, то автономной такую систему назвать нельзя. Поэтому обход препятствий обычно выделяется как отдельный и важный модуль навигации. Общая схема задачи локального обхода препятствий представлена на рисунке 1.

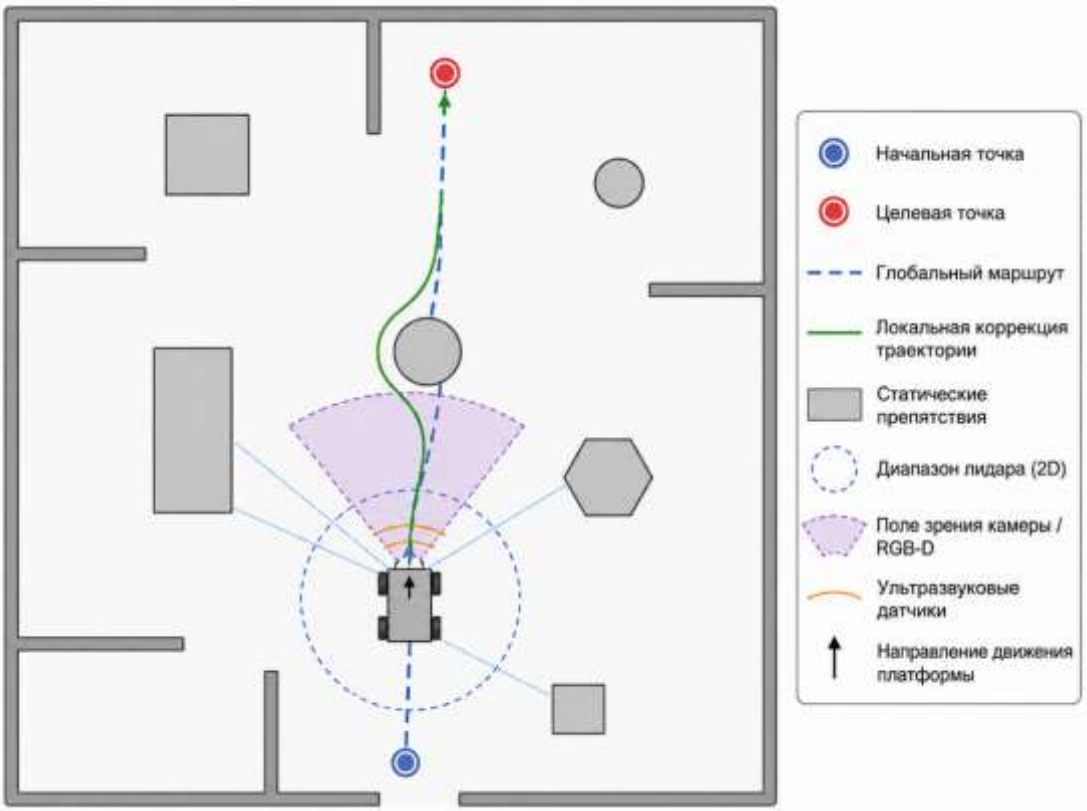


Рисунок 1 – Общая схема задачи локального обхода препятствий: датчики, препятствия, глобальный маршрут и локальная коррекция движения

Главная задача заключается в том, чтобы переместить платформу из одной точки в другую и при этом не допустить столкновения с объектами окружающей среды. В некоторых условиях препятствия и рабочая зона могут быть заранее известны, например при движении робота по складу. Но даже в такой задаче могут появляться объекты, которых нет на карте: люди, другие роботы, коробки, тележки или временные преграды.

Долгое время для решения этой задачи применялись классические алгоритмы. Они основаны на математических моделях, геометрии, картах занятости и эвристиках. К ним можно отнести искусственные потенциальные поля, метод векторной гистограммы, Dynamic Window Approach, A*, Dijkstra и другие методы планирования. Их главное преимущество в том, что поведение алгоритма можно достаточно легко объяснить и настроить вручную.

В последние годы все чаще применяются нейросетевые методы. Они позволяют использовать изображение с камеры, данные лидара, радара, карты глубины и другие признаки, которые сложно полностью описать обычными правилами. Нейросеть может обучаться отличать опасное пространство от свободного, определять тип препятствия или напрямую выдавать команды управления платформой.

Цель статьи – сравнить классические и нейросетевые методы определения и обхода препятствий автономной транспортной платформой. Важно рассмотреть, где эти методы применимы, какие у них слабые места и почему на практике часто выгоднее объединять оба подхода.

1. Постановка задачи

Задача управления автономной транспортной платформой заключается в выборе безопасного управляющего воздействия в текущий момент времени. Для колесной платформы таким воздействием обычно является линейная скорость и угловая скорость, а для платформ автомобильного типа – скорость движения и угол поворота колес. В любом случае команда должна учитывать не только положение препятствий, но и конструктивные ограничения самой платформы.

В реальных условиях платформа не может мгновенно остановиться или резко изменить направление движения. Нельзя выполнить маневр, который не соответствует кинематической схеме робота. На движение влияет максимальная скорость, допустимое ускорение, инерция, радиус поворота, скорость изменения угла поворота колес, а также задержки при получении и обработке данных от датчиков. Поэтому алгоритм обхода препятствий должен быть корректным не только по геометрии маршрута, но и физически выполнимым для конкретной платформы.

Большое значение имеет качество данных от датчиков. Камеры могут нестабильно работать при слабом освещении, ультразвуковые датчики подвержены шумам и ошибкам отражения, а лидары в некоторых случаях хуже определяют прозрачные или зеркальные поверхности. При одновременной работе нескольких активных датчиков также возможны помехи. Поэтому качество восприятия среды является одним из ключевых факторов, которые влияют на работу алгоритма.

Задача обхода препятствий обычно относится к локальному уровню навигации. Если глобальный планировщик задает общее направление движения от начальной точки к цели, то локальный алгоритм работает с текущей обстановкой рядом с платформой. Он анализирует ближайшие препятствия, данные с датчиков и ограничения самой платформы, после чего выбирает безопасное действие. Поэтому локальный уровень особенно важен при движении в изменяющейся или заранее неизвестной среде.

2. Классические алгоритмы обхода препятствий

Классические алгоритмы обхода препятствий основаны на заранее заданных правилах и математических функциях. В отличие от нейросетевых методов, они не требуют обучения на больших наборах данных, а принимают решение по текущей информации от датчиков. Для этого могут использоваться лидары, ультразвуковые датчики, инфракрасные датчики, камеры глубины, энкодеры колес и инерциальный модуль.

Главная задача классического алгоритма – определить, где находится препятствие, и выбрать безопасное движение для платформы. При этом важно учитывать не только расстояние до объектов, но и ограничения самого робота: максимальную скорость, радиус поворота, ускорение и возможность торможения.

Одним из самых простых вариантов является реактивный метод. В этом случае транспортная платформа реагирует только на текущую ситуацию. Например, если препятствие находится спереди, платформа останавливается или поворачивает в сторону, где больше свободного пространства. Такой подход легко реализовать, но он не всегда выбирает оптимальный путь, потому что учитывает только ближайшие препятствия.

Более гибким является метод искусственных потенциальных полей. В нем цель как бы притягивает робота, а препятствия отталкивают его. В результате платформа движется к цели и одновременно старается держаться на безопасном расстоянии от объектов. Метод прост и хорошо работает в реальном времени, но может давать ошибки в сложных ситуациях. Например, робот может попасть в локальный минимум и не продолжить движение, хотя путь к цели существует. Классический вариант этого подхода был описан О. Хатибом для манипуляторов и мобильных роботов [1].

Еще один распространенный подход – Vector Field Histogram. Он строит локальное представление пространства вокруг робота и выбирает свободное направление движения. Метод удобно применять с лидаром или дальномерными датчиками. Его плюс в том, что он подходит для неизвестной среды, но качество работы зависит от точности данных и настройки параметров. В оригинальной работе ВФГ использовал гистограммную сетку, которая обновлялась по данным дальномерных датчиков [2]. Принцип выбора направления в методе Vector Field Histogram показан на рисунке 2.

Для колесных мобильных платформ часто используется Dynamic Window Approach. Этот метод выбирает не только направление, но и конкретные значения линейной и угловой скорости. Алгоритм проверяет, какие варианты движения безопасны и выполнимы для робота с учетом его динамических ограничений. Поэтому DWA хорошо подходит для реальных платформ, где нельзя мгновенно остановиться или резко изменить направление. В работе Fox, Burgard и Thrun этот подход был предложен как метод реактивного избегания столкновений в пространстве скоростей [3].

Также могут применяться локальные карты занятости. В этом случае пространство рядом с роботом делится на свободные, занятые и неизвестные области. По такой карте алгоритм определяет, куда можно двигаться без риска столкновения. Карта может строиться по данным лидара, камеры глубины или нескольких дальномеров.

Таблица 1 – Сравнение классических алгоритмов обхода препятствий

Метод	Данные	Основная идея	Ограничение
Реактивный алгоритм	Ультразвуковые датчики, ИК–датчики, дальномеры	Реакция на ближайшее препятствие по текущим данным	Плохо учитывает общую цель движения
Метод потенциальных полей	Лидар, дальномеры, карта препятствий	Цель притягивает платформу, препятствия отталкивают	Возможны локальные минимумы и колебания
Vector Field Histogram	Лидар, ультразвуковые датчики, локальная карта	Выбор свободного направления по гистограмме препятствий	Зависит от качества сенсорных данных
Dynamic Window Approach	Лидар, одометрия, энкодеры, IMU	Выбор допустимых линейных и угловых скоростей	Требует настройки весов функции оценки
Локальная карта занятости	Лидар, RGB–D камера, дальномеры	Деление пространства на свободные и занятые зоны	Нужно точное обновление карты и фильтрация шумов

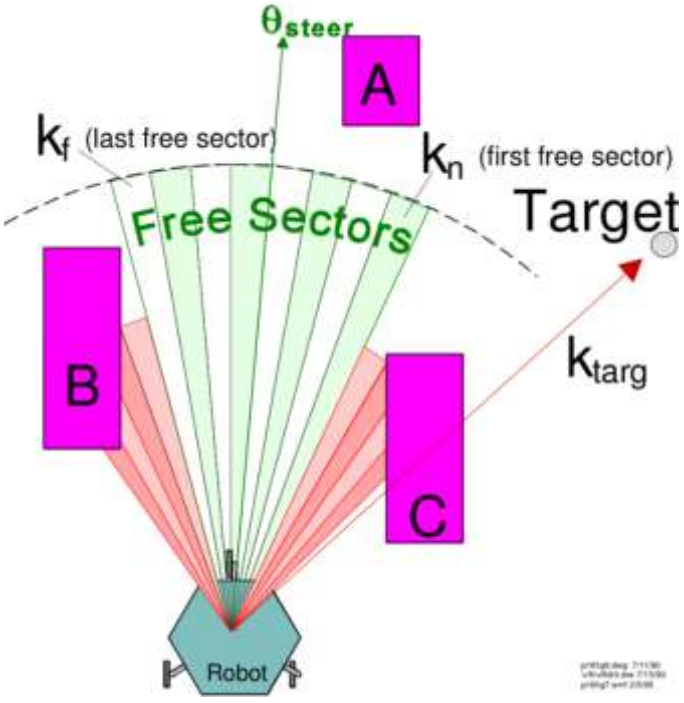


Рисунок 2 – Пример работы метода Vector Field Histogram: робот, локальная сетка и свободные сектора для выбора направления

Для метода Dynamic Window Approach важно не только выбрать направление движения, но и определить допустимую пару скоростей:

линейную и угловую. На рисунке 3 показано пространство возможных скоростей робота. Не все скорости можно использовать, так как часть из них физически недостижима за один шаг управления, а часть может привести к столкновению. Поэтому алгоритм сначала ограничивает пространство скоростей с учетом динамики платформы и расстояния до препятствий, а затем выбирает наиболее подходящую команду движения.

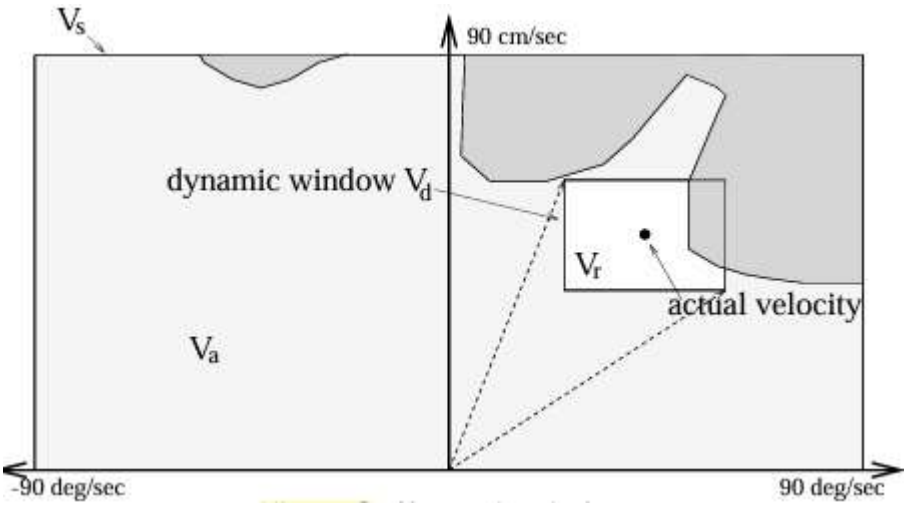


Рисунок 3 – Пространство скоростей в методе Dynamic Window Approach

На схеме V_s обозначает все пространство возможных скоростей, V_a – скорости, которые считаются безопасными относительно препятствий, V_d – динамическое окно, то есть скорости, достижимые за короткий промежуток времени, а V_r – область скоростей, из которой выбирается итоговая команда управления. Точка actual velocity показывает текущую скорость платформы. Таким образом, DWA выбирает движение не из всех возможных вариантов, а только из тех, которые одновременно безопасны и физически выполнимы для робота.

Таким образом, классические методы удобны тем, что их поведение можно объяснить и настроить вручную. Они хорошо подходят для учебных и экспериментальных мобильных платформ, особенно если условия движения заранее понятны. Однако такие методы сильно зависят от качества датчиков и правильного выбора параметров. Поэтому в сложной или быстро меняющейся среде их часто дополняют более современными подходами, включая нейросетевые методы.

3. Нейросетевые методы

Нейросетевые методы отличаются от классических тем, что поведение робота не задается полностью вручную. Вместо набора заранее прописанных правил используется модель, которая обучается на данных. В качестве таких данных могут выступать изображения, показания датчиков, действия

оператора, результаты работы классического алгоритма или опыт, полученный в симуляторе.

Главное преимущество нейросетевых методов заключается в том, что они могут находить сложные признаки, которые трудно описать обычными правилами. Например, модель может анализировать сцену и определять, где находится свободное пространство, где расположено препятствие, а где просто тень или фон. За счет этого нейросетевые подходы подходят для сложных условий, где заранее описать все возможные ситуации почти невозможно.

При этом у таких методов есть и недостатки. Для их работы нужны обучающие данные, вычислительные ресурсы и проверка качества модели. Кроме того, поведение нейросети не всегда просто объяснить. Если модель выдала неправильную команду, бывает сложно понять, какая именно причина привела к ошибке

3.1 Компьютерное зрение и сверточные сети

Для мобильной платформы с камерой часто применяются сверточные нейронные сети. Они позволяют анализировать изображение и определять препятствия, свободные зоны и возможное направление движения. В простом варианте сеть может выбирать одно из действий: двигаться прямо, повернуть налево, повернуть направо или остановиться.

Более сложный вариант – сегментация изображения. В этом случае изображение делится на отдельные области, например свободное пространство, препятствие, человек, пол или стена. Такой подход дает более подробную информацию о сцене и может использоваться для выбора безопасной траектории.

Преимущество компьютерного зрения в том, что камера дает много информации об окружающей среде. Робот может не только обнаружить объект, но и определить его тип. Но качество работы сильно зависит от освещения, положения камеры, фона, качества изображения и условий, в которых обучалась модель. Поэтому нейросеть, обученная в одной среде, может хуже работать в другой.

По этой причине компьютерное зрение лучше рассматривать не как полную замену остальным методам, а как модуль восприятия. Оно помогает платформе понимать обстановку, но финальное решение о движении желательно дополнять проверкой безопасности или классическим локальным алгоритмом.

3.2 Имитационное обучение

Имитационное обучение основано на повторении действий эксперта. Экспертом может быть человек–оператор или уже настроенный классический алгоритм. Модель получает данные о текущем состоянии среды и учится выбирать такое же действие, какое выбрал бы эксперт.

Этот подход удобен тем, что не требует вручную задавать сложную функцию награды. Достаточно собрать примеры корректного поведения. Например, оператор несколько раз проводит платформу через помещение, объезжая препятствия, после чего нейросеть обучается повторять эти действия.

Основной недостаток связан с зависимостью от обучающих данных. Если робот попадает в ситуацию, которой не было в примерах, модель может выбрать неправильное действие. Для автономной платформы это серьезное ограничение, потому что реальные условия часто отличаются от тех, на которых проводилось обучение.

3.3 Обучение с подкреплением

Обучение с подкреплением рассматривает движение робота как последовательность действий. Модель получает награду за полезное поведение, например за приближение к цели, и штраф за столкновение, опасное сближение с препятствием или слишком длинный путь. После большого числа попыток алгоритм постепенно учится выбирать более эффективные действия.

В задачах мобильной робототехники такой подход применяют для навигации в неизвестных и динамических средах. Например, модель может обучаться движению без заранее построенной полной карты, а также обходу движущихся препятствий. Это делает обучение с подкреплением перспективным для ситуаций, где обычные правила не всегда дают хороший результат.

Преимущество метода в том, что он может учитывать не только текущую ситуацию, но и последствия выбранных действий. Например, робот может заранее изменить траекторию, если видит, что объект движется ему навстречу, а не реагировать только в последний момент.

Главная сложность – сам процесс обучения. В реальных условиях нельзя многократно сталкивать платформу с препятствиями, поэтому обучение обычно проводят в симуляторе. После этого возникает проблема переноса модели на физического робота: то, что хорошо работало в виртуальной среде, не всегда сразу работает в реальности.

Таблица 2 – Сравнение нейросетевых алгоритмов обхода препятствий

Подход	**Данные**	**Что делает**	**Основная проблема**
Сверточные сети	Изображения, RGB–D данные	Определяют препятствия и свободные зоны	Зависимость от освещения и данных
Сегментация	Камера, карта глубины	Делит кадр на области	Нужны размеченные данные

Подход	Данные	Что делает	Основна проблема
Мултимодална модел	Камера, лидар, радар, глубина	Обединява разные източници информации	Больше вычислительная нагрузка
Имитационное обучение	Действия оператора или алгоритма	Повторяет поведение эксперта	Плохо работает вне обучающих примеров
Обучение с подкреплением	Симулятор или реальная среда	Учится через награды и штрафы	Сложность обучения и перенос в реальность

4. Метрики для сравнения алгоритмов

Для сравнения классических и нейросетевых методов недостаточно просто указать, смогла платформа доехать до цели или нет. Такой показатель важен, но он не показывает качество самого движения. Платформа может доехать до конечной точки, но при этом двигаться слишком медленно, делать лишние повороты или проходить очень близко к препятствиям. Поэтому для нормального сравнения нужно использовать несколько метрик.

Одной из основных метрик является успешность достижения цели. Она показывает, в каком количестве испытаний платформа смогла доехать до заданной точки без столкновений. Например, если из десяти запусков алгоритм успешно выполнил задачу восемь раз, то успешность составляет 80 процентов. Эта метрика позволяет быстро оценить общую работоспособность метода.

Также важно учитывать количество столкновений и опасных сближений. Даже если платформа в итоге доехала до цели, частые касания препятствий или движение почти вплотную к объектам показывают, что алгоритм работает недостаточно безопасно. Поэтому отдельно можно оценивать минимальное расстояние до препятствия во время движения. Чем больше это расстояние, тем выше запас безопасности.

Еще одной полезной метрикой является время нахождения в опасной зоне. Под опасной зоной можно понимать область вокруг препятствия, где расстояние до объекта меньше допустимого значения. Если платформа долго движется рядом со стеной или другим объектом, это увеличивает риск столкновения.

Для оценки эффективности движения можно использовать длину пройденного пути и время достижения цели. Если один алгоритм строит короткую и понятную траекторию, а другой заставляет платформу делать лишние объезды, это будет видно по длине маршрута. Время прохождения также важно, потому что слишком медленный алгоритм может быть неудобен для реального применения.

Отдельное значение имеет плавность движения. Для транспортной платформы нежелательны резкие остановки, частые повороты и постоянные

изменения скорости. Такое поведение увеличивает нагрузку на приводы и делает движение менее устойчивым. Поэтому можно оценивать количество резких изменений скорости, угла поворота или ускорения.

Также необходимо учитывать задержку принятия решения. Алгоритм должен успевать обрабатывать данные от датчиков и выдавать управляющую команду в реальном времени. Если обработка занимает слишком много времени, платформа может не успеть отреагировать на препятствие. Это особенно важно для нейросетевых методов, которые могут требовать больше вычислительных ресурсов.

Для нейросетевых алгоритмов дополнительно важна обобщающая способность. Она показывает, насколько хорошо модель работает в условиях, которые не встречались при обучении. Для классических методов похожим показателем можно считать устойчивость к изменению параметров среды и шумам датчиков.

Таблица 3 – Метрики сравнения алгоритмов обхода препятствий

Метрика	**Что показывает**	**Почему важна**
Успешность достижения цели	Смогла ли платформа доехать до заданной точки	Показывает общую работоспособность
Количество столкновений	Были ли касания или аварийные ситуации	Напрямую связано с безопасностью
Минимальное расстояние до препятствия	Насколько близко платформа подходила к объектам	Показывает запас безопасности
Время в опасной зоне	Как долго платформа находилась рядом с препятствием	Оценивает рискованность движения
Длина траектории	Насколько рациональным был маршрут	Показывает лишние объезды
Время достижения цели	Как быстро выполнена задача	Важно для практического применения
Плавность движения	Были ли резкие остановки и повороты	Влияет на устойчивость и приводы
Задержка принятия решения	Как быстро алгоритм выдает команду	Важно для работы в реальном времени
Устойчивость к шумам	Как алгоритм работает при ошибках датчиков	Показывает надежность в реальных условиях
Обобщающая способность	Как метод работает в новых условиях	Особенно важно для нейросетевых моделей

Таким образом, сравнение алгоритмов должно проводиться не по одному показателю, а по нескольким метрикам. Это позволяет оценить не только факт выполнения задачи, но и безопасность, скорость, плавность и устойчивость движения.

5. Пример экспериментального сравнения

Для более понятного сравнения можно рассмотреть эксперимент из статьи Selvaraj, Mitrevski и Houben Are Learning–Based Approaches Ready for Real–World Indoor Navigation? A Case for Imitation Learning [4]. В этой работе авторы сравнивали нейросетевые модели, обученные методом имитационного обучения, с классическим методом потенциальных полей. Эксперимент проводился на реальной мобильной платформе KELO ROBILE в помещении университета. Платформа была оснащена RGB–камерой и 2D–лидаром.

Суть эксперимента заключалась в том, что робот сначала управлялся человеком с помощью джойстика. На основе этих демонстраций были собраны данные для обучения моделей. Использовались разные варианты входных данных: только лазерный сканер, только изображение с камеры и объединение лазера с изображением. После этого обученные модели сравнивались с классическим планировщиком на основе потенциальных полей.

Авторы проверяли методы в четырех сценариях. Первый сценарий – движение по прямой без препятствий. Второй – поворот в коридоре. Третий – движение в ограниченном пространстве, где препятствия расположены близко друг к другу. Четвертый – обход динамического препятствия, когда перед роботом проходит человек. Для оценки использовались успешность достижения цели, длина пути, время движения и способность избежать столкновений. Каждый сценарий проверялся пять раз для каждой нейросетевой модели, а метод потенциальных полей использовался как базовый вариант для сравнения [4].

Траектории движения робота в четырех сценариях эксперимента показаны на рисунке 4.

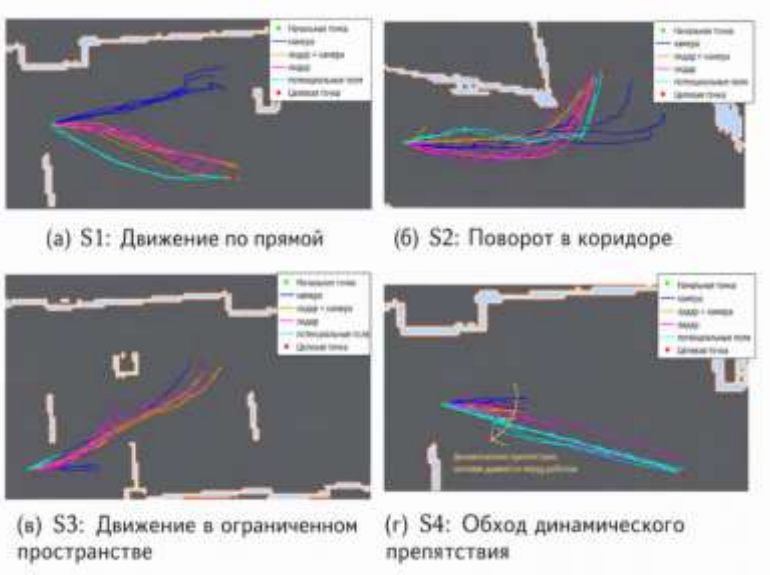


Рисунок 4 – Траектории робота в четырех сценариях эксперимента: прямая, поворот, ограниченное пространство, динамическое препятствие

Таблица 4 – Успешность выполнения сценариев при сравнении нейросетевых моделей и метода потенциальных полей

Сценарий	**Лидарная модель**	**Мультимодальная модель**	**Потенциальные поля**
Движение по прямой	100%	100%	100%
Поворот в коридоре	100%	80%	100%
Ограниченное пространство	40%	80%	0%
Динамическое препятствие	40%	0%	100%

По результатам видно, что нейросетевой подход не всегда однозначно лучше классического. Например, в ограниченном пространстве мультимодальная модель показала 80 процентов успешности, а метод потенциальных полей не справился с этим сценарием. Авторы связывают это с тем, что часть препятствия находилась вне области восприятия робота, и классический метод вел платформу к цели слишком прямолинейно.

Но в сценарии с динамическим препятствием результат получился обратным. Метод потенциальных полей показал 100 процентов успешности, а мультимодальная модель не смогла успешно пройти испытание. В статье это объясняется тем, что в обучающих демонстрациях не было достаточно примеров с динамическими препятствиями. Из–за этого модель хуже справилась с ситуацией, где нужно реагировать на движущийся объект.

Этот эксперимент хорошо показывает главную разницу между подходами. Нейросетевые методы могут лучше работать в сложных статических условиях, особенно если используются данные сразу с нескольких датчиков. Но они сильно зависят от обучающей выборки. Если в данных не было похожей ситуации, модель может ошибиться. Классические методы могут быть менее гибкими, но в некоторых случаях дают более предсказуемое поведение.

6. Сравнительный анализ и гибридный подход

После рассмотрения классических и нейросетевых методов можно сделать вывод, что их нельзя сравнивать только как старый и новый подход. У каждого варианта есть свои сильные и слабые стороны. Классические алгоритмы лучше подходят для случаев, когда нужна предсказуемость, простая настройка и работа в реальном времени. Нейросетевые методы лучше проявляют себя там, где среда сложная и требуется обработка большого количества данных от датчиков.

Классические методы обычно проще реализовать на платформе с ограниченными вычислительными ресурсами. Например, реактивный алгоритм, метод потенциальных полей или DWA могут работать на одноплатном компьютере или менее мощном контроллере. Для них не

требуется заранее собирать большой набор данных и проводить обучение модели. Достаточно настроить основные параметры: минимальное расстояние до препятствия, допустимую скорость, радиус поворота и веса в функции оценки.

При этом классические методы хуже адаптируются к нестандартным ситуациям. Если условия движения сильно меняются, появляются динамические препятствия или данные с датчиков становятся шумными, алгоритм может работать нестабильно. Например, метод потенциальных полей может привести платформу в локальный минимум, а реактивный алгоритм может выбрать слишком простой маневр.

Нейросетевые методы могут лучше учитывать сложные признаки окружающей среды. Они способны работать с изображениями, данными лидара, картами глубины и другими источниками информации. За счет этого модель может не только определить наличие препятствия, но и учитывать его форму, положение, тип и возможное движение. Это особенно важно при работе в среде, где находятся люди, другие роботы или объекты, которые сложно заранее описать правилами.

Но у нейросетевых методов есть серьезные ограничения. Им нужны данные для обучения, вычислительная мощность и проверка на реальной платформе. Кроме того, поведение модели не всегда легко объяснить. Если нейросеть ошиблась, не всегда понятно, из-за чего это произошло: из-за недостатка данных, неправильного обучения, плохого изображения или ситуации, которой не было в обучающей выборке.

Таблица 5 – Сравнение классических и нейросетевых методов обхода препятствий

Критерий	**Классические методы**	**Нейросетевые методы**
Принцип работы	Заранее заданные правила и математические модели	Обучение на данных или через взаимодействие со средой
Требования к данным	Небольшие	Высокие
Вычислительная нагрузка	Обычно ниже	Обычно выше
Объяснимость поведения	Высокая	Ниже, особенно у глубоких моделей
Настройка	Подбор параметров вручную	Обучение и проверка модели
Работа в реальном времени	Обычно хорошо подходит	Зависит от модели и оборудования
Работа в сложной среде	Может быть ограничена	Может быть лучше при хорошем обучении
Риск ошибки	Чаще связан с параметрами и датчиками	Чаще связан с данными и обобщением модели

На практике наиболее перспективным решением является гибридный подход. В таком варианте классические и нейросетевые методы используются вместе, а не противопоставляются друг другу. Нейросетевая часть может отвечать за восприятие среды: обработку изображения, данных лидара, карты глубины и определение препятствий. Классический алгоритм может отвечать за безопасное движение, ограничение скорости и проверку допустимости траектории.

Такой подход особенно полезен для автономной транспортной платформы, потому что безопасность движения не должна полностью зависеть от нейросети. Даже если модель ошиблась при распознавании объекта, классический уровень может дополнительно проверить расстояние до препятствия, ограничить скорость или остановить платформу. Это снижает риск столкновения и делает поведение системы более понятным. Общая структура гибридного подхода к обходу препятствий представлена на рисунке 5.

Таблица 6 – Уровни гибридной системы обхода препятствий автономной транспортной платформы

Уровень системы	**Что выполняет**	**Возможный метод**
Восприятие среды	Получение данных с датчиков	Камера, лидар, радар, датчики глубины
Анализ объектов	Обнаружение препятствий и свободных зон	Нейросетевая модель
Локальное планирование	Выбор безопасного направления или скорости	DWA, потенциальные поля, карта занятости
Контроль безопасности	Проверка расстояний и ограничение команд	Классические правила и пороги
Управление платформой	Передача команд на приводы	Линейная скорость, угол поворота, ускорение

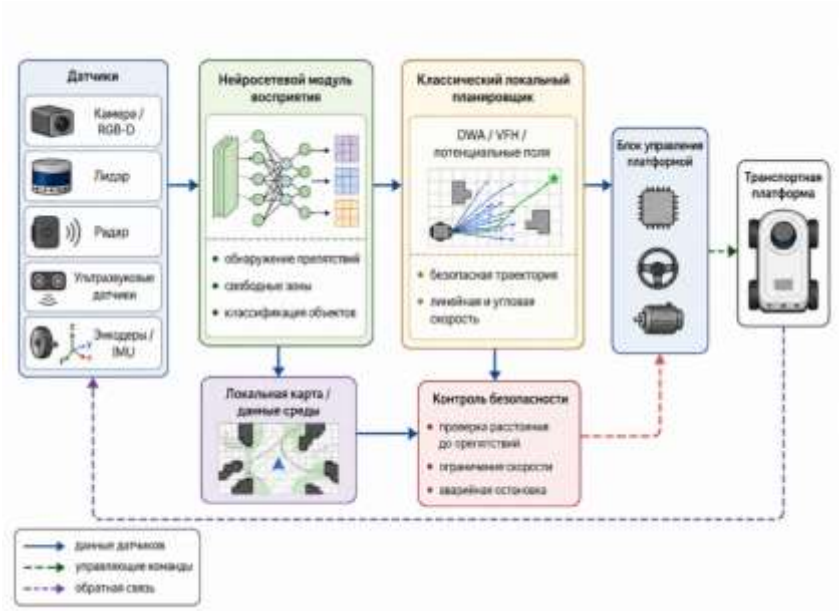


Рисунок 5 – Схема гибридного подхода: датчики, нейросетевой модуль восприятия, классический планировщик и блок управления платформой

Заключение

В статье были рассмотрены классические и нейросетевые методы обхода препятствий автономной транспортной платформой. Классические методы основаны на заранее заданных правилах, математических моделях и локальном планировании движения. Они отличаются понятностью, предсказуемостью и сравнительно низкими требованиями к вычислительным ресурсам. Такие методы удобно применять на простых и экспериментальных платформах, где важно быстро получить рабочий и объяснимый алгоритм.

Нейросетевые методы используют обучение на данных и позволяют работать с более сложной информацией от датчиков. Они могут анализировать изображения, данные лидара, карты глубины и другие признаки окружающей среды. Их преимущество заключается в способности учитывать сложные ситуации, которые трудно полностью описать вручную. Но такие методы требуют обучающих данных, вычислительных ресурсов и тщательной проверки качества работы.

Сравнение показывает, что ни один из подходов нельзя считать универсально лучшим. Классические алгоритмы лучше подходят для предсказуемых условий и задач, где важна объяснимость поведения. Нейросетевые методы перспективны для сложной и изменяющейся среды, но их надежность сильно зависит от качества обучения и полноты обучающей выборки.

Наиболее рациональным вариантом для автономной транспортной платформы является гибридный подход. В такой системе нейросетевые методы могут использоваться для восприятия окружающей среды и

распознавания препятствий, а классические алгоритмы – для проверки безопасности и формирования управляющих команд. Это позволяет повысить качество навигации и при этом сохранить контролируемость движения платформы.

Список литературы:

1. Khatib O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots // The International Journal of Robotics Research. – 1986. – Vol. 5, No. 1. – P. 90–98. DOI: 10.1177/027836498600500106
2. Borenstein J., Koren Y. The Vector Field Histogram – Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots // IEEE Transactions on Robotics and Automation. –1991. – Vol. 7, No. 3. – P. 278–288. DOI: 10.1109/70.88137
3. Fox D., Burgard W., Thrun S. The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 1997. – Vol. 4, No. 1. – P. 23–33. DOI: 10.1109/100.580977
4. Selvaraj N., Mitrevski A., Houben S. Are Learning-Based Approaches Ready for Real-World Indoor Navigation? A Case for Imitation Learning // 2025 European Conference on Mobile Robots (ECMR). – Padova, Italy, 2025. – P. 1–7. DOI: 10.1109/ECMR65884.2025.11163316
5. Liang J., Patel U., Sathyamoorthy A. J., Manocha D. Crowd-Steer: Realtime Smooth and Collision-Free Robot Navigation in Densely Crowded Scenarios Trained Using High-Fidelity Simulation // Proceedings of the Twenty-Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). – 2020. – P. 4221–4228. DOI: 10.24963/ijcai.2020/583
6. van den Berg J., Guy S. J., Lin M., Manocha D. Reciprocal n-body collision avoidance // Algorithmic Foundations of Robotics VIII : Springer Tracts in Advanced Robotics. – Berlin : Springer, 2011. – P. 3–19. DOI: 10.1007/978–3–642–19457–3_1
7. Alyassi R., Cadena C., Riener R., Paez-Granados D. Social robot navigation: a review and benchmarking of learning-based methods // Frontiers in Robotics and AI. – 2025. – Vol. 12. – P. 1658643. DOI: 10.3389/frobt.2025.1658643 EDN: PSAWLD

УДК 004.94:629.3

Скалинский Р. А.
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

ПРОБЛЕМА ПЕРЕХОДА ОТ СИМУЛЯЦИИ К РЕАЛЬНОЙ АВТОНОМНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ПЛАТФОРМЕ

Аннотация: В статье рассматривается проблема переноса алгоритмов управления автономной транспортной платформой из симуляционной среды в реальные условия. Показано, что успешная работа модели в виртуальной среде не означает такой же устойчивой работы на реальной платформе. Основное внимание уделено причинам разрыва между симуляцией и реальностью: отличиям изображения с камеры, упрощенной физике движения, шумам датчиков, задержкам управления и ошибкам в постановке награды. В качестве примеров рассмотрены опубликованные эксперименты по автономному вождению, полету квадрокоптера и доменной рандомизации. На основе этих работ сформулированы выводы, которые могут быть использованы при разработке нейросетевой системы управления автономной транспортной платформой.

Ключевые слова: автономная транспортная платформа, Sim-to-Real, нейросетевое управление, компьютерное зрение, симуляция, доменная рандомизация, автономное движение.

Введение

Симуляция часто используется при разработке автономных транспортных платформ, потому что она позволяет проверять алгоритмы без риска для оборудования и людей. В виртуальной среде можно быстро менять трассу, освещение, препятствия, покрытие дороги и поведение других объектов. Это особенно важно для нейросетевых методов, которым требуется большое количество данных и повторений.

Но у такого подхода есть слабое место. Модель может хорошо работать в симуляторе, но после переноса на реальную платформу начать ошибаться. Эта проблема обычно называется Sim-to-Real или «разрыв между симуляцией и реальностью». Для автономной транспортной платформы она проявляется не только в качестве изображения, но и в динамике движения, работе датчиков, задержках исполнительных механизмов и непредсказуемости реальной среды.

Цель статьи – кратко рассмотреть, почему возникает этот разрыв, какие выводы можно сделать из реальных экспериментов и как это учитывать при разработке системы управления автономной транспортной платформой.

1. Почему симуляция не полностью заменяет реальную платформу

В симуляторе разработчик обычно видит чистую и удобную модель мира. Камера может давать изображение без грязи на объективе, без бликов, смаза, случайных теней и неточного баланса белого. Датчики могут работать без пропусков и задержек. Колеса могут иметь идеальное сцепление с поверхностью, а моторы – одинаковую реакцию на одну и ту же команду.

В реальности все сложнее. Камера зависит от освещения, угла установки и качества объектива. Разметка на дороге или полу может быть стерта. Препятствие может иметь форму, которую модель не видела при обучении. Платформа может немного уводить в сторону из-за механики, люфта, неровного покрытия или разного заряда аккумулятора. Поэтому главная ошибка при использовании симуляции – считать ее точной копией реальности.

Симуляция полезна не как полная замена реальных испытаний, а как безопасный этап подготовки. Она помогает обучить базовое поведение, найти грубые ошибки и проверить разные варианты алгоритма. Но финальная проверка все равно должна проходить на реальной платформе.

Для наглядного понимания проблемы Sim-to-Real важно сравнить не только алгоритмы, но и сами входные данные, которые получает модель. Даже если в симуляторе и в реальной среде решается одна и та же задача движения, изображение с камеры может заметно отличаться. В виртуальной среде обычно проще контролировать освещение, качество поверхности, положение объектов и отсутствие случайных помех. В реальности появляются тени, шум камеры, блики, неровности покрытия, неточности перспективы и объекты, которые сложно заранее предусмотреть. Поэтому модель, обученная только на аккуратных симуляционных кадрах, может хуже работать на реальной платформе.

Рисунок 1 – Сравнение изображения в симуляторе и изображения с реальной камеры автономной платформы

2. Что показывают опубликованные эксперименты

В работе A. Bewley и соавторов была рассмотрена задача переноса модели движения по полосе из симуляции на реальный автомобиль. Авторы обучали систему на виртуальной дороге и использовали перенос между изображениями симуляции и реальности. Важная деталь этого эксперимента в том, что реальные

изображения применялись без управляющих меток. То есть система не получала готовые ответы для реального автомобиля, а пыталась связать виртуальную и реальную области данных. В результате автомобиль проехал 3 км по сельской дороге без вмешательства водителя. При этом авторы отдельно отмечают, что хорошие offline-метрики не всегда совпадают с качеством реального движения [1].

Этот результат важен для автономной платформы тем, что показывает: перенос возможен, но его нельзя оценивать только по ошибке на наборе изображений. Алгоритм может иметь небольшую ошибку предсказания на отдельных кадрах, но в реальном движении ошибка накапливается. Платформа чуть смещается, получает новый кадр уже из неправильного положения, затем ошибка усиливается. Поэтому для автономного движения важна проверка в замкнутом контуре, когда действия модели сразу влияют на следующее состояние системы.

Другой пример – работа B. Osiński и соавторов по обучению системы управления полноразмерным автомобилем в CARLA. Политика управления обучалась в симуляции, а затем тестировалась на реальном автомобиле. Авторы проверяли 10 вариантов модели на 9 реальных сценариях, суммарно выполнив более 400 тестовых поездок. Реальные сценарии имели длину около 2,5 км, скорость составляла примерно 15–30 км/ч, а управление работало с частотой 10 Гц [2].

Помимо факта успешного прохождения маршрута, в подобных экспериментах важно оценивать, насколько движение автономной системы отличается от ожидаемой траектории. В работе B. Osiński и соавторов для этого рассматривалось отклонение от экспертных траекторий в разных сценариях движения. Такой подход полезен тем, что он показывает не только сам факт работы модели, но и устойчивость ее поведения: чем меньше отклонение и разброс значений, тем ближе движение системы к заданному маршруту. На рисунке 2 приведен пример такого сравнения для нескольких моделей и сценариев. В обозначениях на рисунке используются условные названия моделей из эксперимента B. Osiński и соавторов. Для данной статьи важны не сами сокращения моделей, а общий вывод: величина отклонения заметно зависит от сценария движения и выбранного варианта модели.

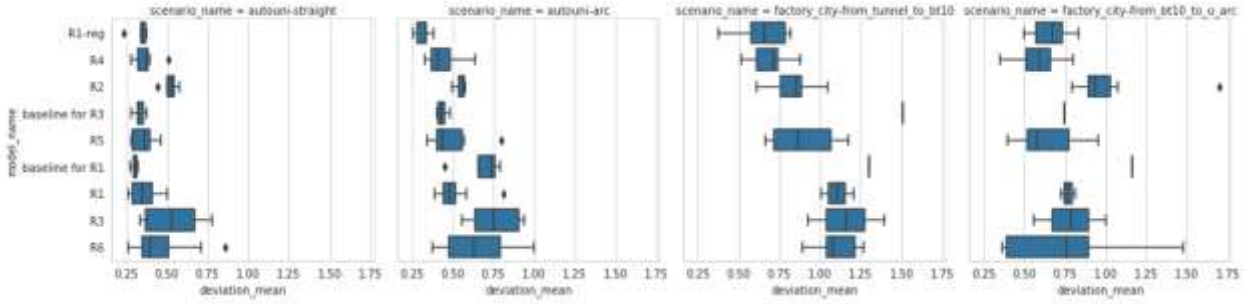


Рисунок 2 – Сравнение среднего отклонения моделей от заданной траектории в разных сценариях движения

В этой работе особенно полезны не только успешные результаты, но и описанные ошибки. Например, модель, обученная на картах CARLA с двойной дорожной разметкой, хуже воспринимала одинарную разметку на реальной дороге. Еще один показательный случай связан с функцией награды: из-за слишком редких контрольных точек в симуляции траектория на повороте фактически проходила через бордюр, и похожее поведение перенеслось на реальный автомобиль [2]. Это хорошо показывает, что Sim-to-Real связан не только с качеством картинки. Если в симуляции неправильно задана цель, модель может перенести в реальность не только полезное поведение, но и ошибку.

Для мобильной платформы меньшего масштаба этот вывод также применим. Если в симуляции награда задается только за быстрое достижение цели, модель может научиться «срезать» углы, ехать слишком близко к препятствиям или выбирать траектории, которые в реальности небезопасны. Поэтому награда должна учитывать не только факт достижения цели, но и устойчивость, запас до препятствий, плавность движения и допустимые ограничения платформы.

Еще один известный пример связан с квадрокоптером CAD2RL. F. Sadeghi и S. Levine обучали модель обхода препятствий полностью в виртуальных CAD-сценах без реальных обучающих изображений. Нейросеть получала один RGB-кадр с монокулярной камеры и выдавала команды скорости. Для переноса в реальность авторы сильно рандомизировали визуальные параметры симуляции. Модель затем проверялась на реальном квадрокоптере в помещениях, где нужно было лететь через коридоры, открытые зоны и рядом с мебелью [3].

Смысл этого эксперимента не в том, что симулятор должен быть максимально красивым. Наоборот, авторы показывают, что иногда полезнее сделать виртуальную среду разнообразной, чем фотореалистичной. Если модель во время обучения видит много вариантов текстур, освещения и расположения объектов, она меньше привязывается к конкретной картинке и лучше выделяет геометрию свободного пространства.

Похожая идея используется в доменной рандомизации. В работе J. Tobin и соавторов модель обучалась на синтетических изображениях с нереалистичными случайными текстурами, но затем смогла работать с реальными изображениями. В задаче локализации объекта была достигнута точность около 1,5 см, а полученный детектор применялся для захвата объектов роботом [4]. Для транспортной платформы это означает, что при обучении в симуляции можно специально менять цвет пола, яркость, текстуры стен, положение источников света и внешний вид препятствий. Тогда реальная сцена становится для модели еще одним вариантом уже знакомого разнообразия.

3. Основные причины разрыва между симуляцией и реальностью

На основе рассмотренных экспериментов можно выделить несколько основных причин, из-за которых модель теряет качество после переноса на реальную платформу.

Таблица 1 – Причины разрыва Sim-to-Real и способы его снижения

Причина	**Как проявляется**	**Что делать при разработке**
Визуальный разрыв	В реальной камере другие цвета, тени, блики, шум и перспектива.	Рандомизировать освещение и текстуры, добавлять реальные кадры для проверки.
Разрыв в физике	Платформа иначе ускоряется, тормозит, поворачивает, скользит и реагирует с задержкой.	Добавлять задержки и шум, проверять модель на малой скорости.
Разрыв датчиков	Датчики дают шум, пропуски, смещение и нестабильные значения.	Моделировать шум, фильтровать данные, сравнивать реальные и виртуальные измерения.
Ошибка в награде	Модель выполняет формальную цель, но может делать это небезопасно.	Оценивать траекторию, запас до препятствий и плавность управления.
Недостаточная проверка	На тестовом наборе модель выглядит лучше, чем при движении.	Использовать этапы: offline-тест, симуляция, стенд, реальная платформа.

4. Что важно для автономной транспортной платформы

Для автономной транспортной платформы, которая движется по ограниченной территории, проблема Sim-to-Real проявляется особенно заметно при распознавании препятствий. В симуляторе препятствие обычно имеет понятную форму и хорошо отделяется от фона. В реальности это может быть коробка, человек, стойка, край мебели, тень или объект частично вне кадра. Поэтому нейросетевая система управления не должна опираться только на один «идеальный» вид препятствия.

Если платформа использует камеру, нужно заранее собирать реальные кадры с той среды, где она будет работать. Даже небольшая выборка без разметки может помочь понять, насколько изображение отличается от симулятора. Если есть возможность разметки, лучше добавить несколько реальных примеров препятствий, сложных теней и разных покрытий пола. Это не отменяет симуляцию, но снижает риск, что модель будет работать только в виртуальной среде.

Также важно учитывать движение самой платформы. Нейросеть может корректно определить свободную зону, но реальная платформа все равно не сможет мгновенно повернуть или остановиться. Поэтому в системе управления нужен запас по расстоянию до препятствия. Для дипломной работы это можно сформулировать так: нейросеть отвечает за восприятие и оценку ситуации, а контур управления должен дополнительно учитывать ограничения реальной механики.

Практически это приводит к гибридному подходу. Нейросеть может распознавать препятствия или свободную область движения, а классический алгоритм может проверять безопасность команды, ограничивать скорость и запрещать слишком резкие маневры. Такой вариант выглядит более надежным, чем полностью end-to-end управление, где одна модель сразу преобразует изображение в команды двигателям.

5. Как организовать переход от симуляции к реальности

Переход от симуляции к реальной платформе лучше делать не одним шагом, а поэтапно. Сначала алгоритм проверяется в простой виртуальной среде, где есть базовые препятствия и понятная траектория. Затем в симуляцию добавляются случайные изменения: цвет и текстура поверхности, положение препятствий, освещение, шум камеры, задержка управления. После этого модель проверяется не только на отдельных кадрах, но и в замкнутом контуре, когда ее команды действительно меняют положение платформы.

Следующий этап – тесты на реальных данных без движения. Например, можно подать модели кадры с камеры платформы и посмотреть, правильно ли она определяет препятствия и свободную зону. Такой этап безопасен, потому что платформа еще не выполняет команды. Только после этого имеет смысл переходить к движению на малой скорости и на ограниченном участке.

Последний этап – испытания в условиях, близких к реальным. Здесь важно фиксировать не только успешность проезда, но и причины ошибок: неверное распознавание препятствия, неправильная траектория, запоздалая реакция, потеря линии движения, слишком резкий поворот. Такой журнал ошибок полезнее, чем общая фраза «модель работает» или «модель не работает». Он показывает, что именно нужно улучшать: данные, симулятор, алгоритм управления или аппаратную часть.

Заключение

Проблема Sim-to-Real является одной из ключевых при разработке автономной транспортной платформы с нейросетевой системой управления. Симуляция позволяет быстро и безопасно обучать алгоритмы, но она не является полной копией реального мира. Разрыв возникает из-за отличий изображения, датчиков, физики движения, задержек, поведения препятствий и ошибок в самой постановке задачи.

Рассмотренные эксперименты показывают, что перенос из симуляции в реальность возможен. Автомобиль может проехать реальный маршрут после обучения на виртуальных данных, квадрокоптер может обходить препятствия после обучения в CAD-среде, а доменная рандомизация может помочь модели меньше зависеть от внешнего вида сцены. Но эти результаты также показывают ограничения: offline-метрики не всегда отражают реальное движение, а ошибка в симуляционной награде может перенестись на реальную систему.

Для автономной транспортной платформы наиболее разумным является поэтапный подход. Симуляцию следует использовать для первичного обучения и проверки опасных сценариев, реальные данные – для адаптации восприятия, а испытания на платформе – для оценки поведения в замкнутом контуре. При этом нейросетевые методы лучше сочетать с классическими ограничениями безопасности, чтобы команда управления учитывала реальные возможности платформы.

Список литературы:

1. Bewley A., Rigley J., Liu Y., Hawke J., Shen R., Lam V.-D., Kendall A. Learning to Drive from Simulation without Real World Labels // 2019 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2019. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793668 EDN: QPYWQH
2. Osiński B., Jakubowski A., Zięcina P., Miłoś P., Galias C., Homoceanu S., Michalewski H. Simulation-Based Reinforcement Learning for Real-World Autonomous Driving. – 2019. – URL: https://arxiv.org/abs/1911.12905 (дата обращения: 05.06.2026).
3. Sadeghi F., Levine S. CAD2RL: Real Single-Image Flight Without a Single Real Image // Robotics: Science and Systems XIII. – 2017. DOI: 10.15607/RSS.2017.XIII.034
4. Tobin J., Fong R., Ray A., Schneider J., Zaremba W., Abbeel P. Domain Randomization for Transferring Deep Neural Networks from Simulation to the Real World // 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – 2017. DOI: 10.1109/IROS.2017.8202133
5. Zhao W., Queralta J. P., Westerlund T. Sim-to-Real Transfer in Deep Reinforcement Learning for Robotics: a Survey // 2020 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). – 2020. DOI: 10.1109/SSCI47803.2020.9308468 EDN: JNUMFS

Dosovitskiy A., Ros G., Codevilla F., López A. M., Koltun V. CARLA: An Open Urban Driving Simulator. – 2017. – URL: https://arxiv.org/abs/1711.03938 (дата обращения: 05.06.2026).

УДК 621.311:004.75

Игнатьев И. К.
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК СЕРВЕРНЫХ СТОЕК ЦЕНТРА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Аннотация. В статье рассматривается проблема отсутствия актуальных нормативных методик расчета электрических нагрузок для оборудования центров обработки данных (ЦОД) в Российской Федерации. На примере серверной стойки проекта системы диспетчерского контроля и управления (СДКУ), проведено сравнение трех методов расчета: по номинальной мощности блоков питания, по методике ASHRAE TC 9.9, а также расчет на основе паспортных значений TDP (Thermal Design Power) компонентов сервера ASUS RS720A-E12-RS12 с двумя процессорами AMD EPYC 9375F. Выполнено сравнение расчетных значений с фактическими данными системы мониторинга. Показано, что метод расчета по TDP комплектующих обеспечивает минимальную погрешность. Обоснована необходимость разработки отечественной нормативной базы для проектирования электропитания ЦОД.
Ключевые слова: центр обработки данных, электрические нагрузки, серверная стойка, TDP, ASHRAE, энергопотребление, методика расчета.

1. Введение

Современные системы диспетчерского контроля и управления (СДКУ) предъявляют высокие требования к надежности и бесперебойности функционирования серверного оборудования. В составе таких систем используются специализированные ЦОД или серверные помещения, где критически важным этапом является корректный расчет электрических нагрузок, от которого зависят выбор питающих кабелей, трансформаторов, источников бесперебойного питания (ИБП) и дизель-генераторных установок (ДГУ). Ошибки на этапе проектирования могут привести к перегрузкам, отказам оборудования и сбоям в управлении технологическими процессами.

В Российской Федерации нормативно-техническая база для расчета электрических нагрузок ЦОД находится в кризисном состоянии. Действующие документы, такие как СП 31-110-2003 [9] и «Указания по расчету электрических нагрузок» (ВСН 59-88) [10], разрабатывались для промышленных предприятий и не учитывают специфику современного ИТ-оборудования: круглосуточный режим работы, высокую плотность размещения стоек (до 15–30 кВт на стойку), наличие мощных источников гармоник (ИБП с двойным преобразованием, импульсные блоки питания серверов). Более поздний СП 256.1325800.2016 [11] также не содержит специализированных методик для ЦОД. В мировой практике давно

применяются специализированные стандарты, такие как ANSI/TIA-942-C [2] и ISO/IEC 22237-1 [4], учитывающие особенности инфраструктуры дата-центров.

Попытка внедрения первого профильного стандарта ГОСТ Р 70139-2022 [5] завершилась его отменой в декабре 2023 года из-за критических ошибок и несоответствия реалиям рынка [6, 7]. Профессиональное сообщество неоднократно указывало на проблемы этого документа [8].

В мировой практике сложился ряд подходов к расчету нагрузок серверных стоек:

1. метод «по шильдику» – суммирование номинальных мощностей блоков питания;
2. методика ASHRAE TC 9.9 (Thermal Guidelines for Data Processing Environments) [1] – основана на классификации стоек по плотности мощности;
3. расчет на основе TDP компонентов – суммирование тепловыделений процессоров, памяти, накопителей и других устройств.

Цель настоящей работы – на примере реального серверного оборудования, установленного в составе Системы диспетчерского контроля и управления (СДКУ), выполнить сравнительный анализ указанных методик расчета электрической нагрузки на стойку и сопоставить полученные результаты с фактическими данными штатной системы мониторинга.

2. Объект и методы исследования

2.1. Характеристика объекта

Фактические значения тока и мощности фиксировались штатной системой мониторинга инфраструктуры (PDU с функцией измерения электрических параметров, класс точности 0.5).

Исследование проводилось на серверной стойке, входящей в состав Системы диспетчерского контроля и управления (СДКУ). В стойке установлено 9 серверов конфигурации ASUS RS720A. Технические характеристики одного сервера приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Конфигурация сервера ASUS RS720A в составе СДКУ

Компонент	Модель / Характеристика	Количество
Платформа	ASUS RS720A-E12-RS12/WOCPU/WOM/WOGPU/Z	1
Процессор	AMD EPYC 9375F (32 ядра, 3.85/4.8 ГГц, 256 МБ L3, TDP 320 Вт)	2

Компонент	Модель / Характеристика	Количество
Оперативная память	64 ГБ DDR5 RDIMM ECC 5600 МГц	4
RAID-контроллер	Broadcom MegaRAID 9440-8i	1
SSD-накопитель	Samsung PM9A3 960 ГБ U.2 NVMe	4
HDD-накопитель	Seagate Exos 7E10 6 ТБ SAS	4
Сетевая карта	Broadcom 57840S 10GBase-T (2 порта)	3
Блок питания	2600 Вт (1+1 резервирование)	2

На момент проведения измерений оборудование СДКУ находилось в режиме испытаний, загрузка процессорных ядер составляла 50–70% от номинальной. Фактические значения тока и мощности фиксировались штатной системой мониторинга инфраструктуры (PDU с функцией измерения электрических параметров, класс точности 0.5). Напряжение питающей сети стойки – 230 В, что соответствует требованиям IEC 60364-5-55 [3] для вычислительных установок. Коэффициент мощности (cos φ) для оборудования с активной коррекцией принят равным 0.95.

Рисунок 1 – сервер ASUS RS720A

2.2. Методы расчета

Метод 1. Расчет по номинальной мощности блоков питания

Данный метод является наиболее простым и консервативным: мощность стойки определяется как сумма номинальных мощностей БП всех серверов.

Метод 2. Расчет по методике ASHRAE TC 9.9

Согласно рекомендациям ASHRAE TC 9.9 [1], серверные стойки классифицируются по плотности мощности (глава 4). Для серверов класса High Density (8–15 кВт на стойку) типовое значение потребляемой мощности на один сервер определяется на основе статистических данных [1].

Метод 3. Расчет по TDP компонентов

Данный метод основан на суммировании паспортных значений тепловыделений (TDP) или максимальной потребляемой мощности каждого компонента сервера с последующим умножением на коэффициент одновременности загрузки (в данном случае – 0.7, соответствующий режиму испытаний).

3. Результаты расчетов

3.1. Метод 1 – по номинальной мощности блоков питания

Блоки питания сервера имеют номинальную мощность 2600 Вт (с резервированием 1+1, то есть фактически каждый БП рассчитан на полное покрытие нагрузки).

Для одного сервера: $P_{\text{БП}} = 2600$ Вт

Для стойки из 9 серверов (в составе СДКУ):

$$P_{\text{стойкаБП}} = 2600 \times 9 = 23\,400 \text{ Вт} = 23{,}4 \text{ кВт}$$

Ток при напряжении 230 В и cos φ = 0,95:

$$I_{\text{стойкаБП}} = \frac{P_{\text{стойкаБП}}}{U \times \cos\varphi} = \frac{23400}{230 \times 0{,}95} \approx 107 \text{ А}$$

Результат: расчетная мощность стойки – 23,4 кВт, расчетный ток – 107 А.

3.2. Метод 2 – по методике ASHRAE TC 9.9

Согласно рекомендациям, ASHRAE TC 9.9 (2021) [1], серверные стойки классифицируются по плотности мощности:

1. low density: до 2 кВт/стойку;
2. medium density: 4–6 кВт/стойку;
3. high density: 8–15 кВт/стойку;
4. very high density: 15–30 кВт/стойку и выше.

Для серверов с двумя высокопроизводительными процессорами AMD EPYC 9375F и расширенной дисковой подсистемой (8 накопителей) среднее значение потребляемой мощности по статистике ASHRAE составляет 1200–1500 Вт на сервер. Принимаем среднее значение 1350 Вт [1].

Для стойки из 9 серверов:

$P_{ASHRAE} = 2600 \times 9 = 23\,400$ Вт $= 12{,}15$ кВт.

Ток при напряжении 230 В и cos φ = 0,95:

$$I_{ASHRAE} = \frac{P_{\text{стойка}ASHRAE}}{U \times \cos\varphi} = \frac{12150}{230 \times 0{,}95} \approx 55{,}6 \text{ А}$$

Результат: расчетная мощность стойки – 12,15 кВт, расчетный ток – 55,6 А.

3.3. Метод 3 – по TDP компонентов

Расчет выполняется суммированием максимальной потребляемой мощности всех компонентов одного сервера. Значения взяты из технической документации производителей [3–8].

Таблица 2 – Расчет максимальной потребляемой мощности одного сервера по TDP компонентов

Компонент	TDP / макс. мощность, Вт	Количество	Суммарная мощность, Вт
Процессор AMD EPYC 9375F [3]	320	2	640
Память DDR5 RDIMM 64 ГБ [4]	~15	4	60
RAID-контроллер Broadcom 9440-8i [5]	10,05	1	10,05
SSD Samsung PM9A3 960 ГБ [6]	9,5	4	38
HDD Seagate Exos 7E10 6 ТБ [7]	10,8	4	43,2
Сетевая карта Broadcom 57840S [8]	~15	3	45
Системная плата и вентиляторы	~50	1	50
Итого (максимальная нагрузка 100%)			886,25

Мощность одного сервера в максимальной конфигурации (100% загрузки всех компонентов) составляет 886 Вт. Для стойки из 9 серверов:

Для стойки из 9 серверов:

$$P_{TDPmax} = 886{,}25 \times 9 = 7\,976{,}25 \text{ Вт} \approx 7{,}98 \text{ кВт}$$

Ток при напряжении 230 В и cos φ = 0,95:

$$I_{TDPmax} = \frac{P_{\text{стойка}ASHRAE}}{U \times \cos\varphi} = \frac{7976{,}25}{230 \times 0{,}95} \approx 36{,}5 \text{ А}$$

Результат: расчетная мощность стойки (при 100% теоретической нагрузке) – 7,98 кВт, расчетный ток – 36,5 А.

4. Сравнение с фактическими данными мониторинга

В ходе заводских приёмо-сдаточных испытаний системы мониторинга серверной стойки СДКУ были получены следующие фактические значения (усреднение за 24 часа):

$$P_{\text{факт}} = 3{,}95 \text{ кВт}$$

Фактический ток:

$$I_{\text{факт}} = \frac{3950}{230 \times 0{,}95} \approx 18{,}1 \text{ А}$$

Таблица 3 – Сравнение результатов расчетов с фактическими данными (на этапе приемо-сдаточных испытаний)

Метод расчета	**Мощность на стойку, кВт**	**Ток на стойку, А**	**Отклонение от факта (по мощности), %**
По номиналу БП (2600 Вт × 9)	23,4	107	492%
По методике ASHRAE TC 9.9 [1]	12,15	55,6	208%
По TDP компонентов (100% нагрузка)	7,98	36,5	102%
Фактические данные мониторинга СДКУ	3,95	18,1	0%

Как видно из таблицы, все рассмотренные методики дают значительное завышение относительно реального потребления в условиях испытаний. Наименьшее завышение (в 2 раза) демонстрирует метод расчета по TDP компонентов, что логично, так как он оценивает максимальную теоретическую мощность. Метод ASHRAE завышает более чем в 3 раза, а метод по номиналу блоков питания – почти в 6 раз.

5. Заключение

В результате выполненного исследования получены следующие основные выводы.

1. Метод расчета по TDP компонентов позволяет оценить максимальную теоретическую мощность серверной стойки для конкретной конфигурации. В проведённом эксперименте эта оценка (7,98 кВт) ровно в 2 раза превысила фактическое потребление в режиме заводских приёмо-сдаточных испытаний (3,95 кВт), что соответствует загрузке оборудования примерно на 50%. Таким образом, метод TDP даёт достоверную верхнюю границу и может быть рекомендован для проектирования систем электроснабжения с запасом.
2. Методика ASHRAE TC 9.9 [1] даёт завышение более чем в 3 раза (12,15 кВт против 3,95 кВт), что делает её малопригодной для точного расчёта нагрузки конкретных стоек в режиме неполной загрузки. Однако для оценочных расчётов на стадии концептуального проектирования она может применяться.
3. Метод по номинальной мощности блоков питания даёт пяти-шестикратное завышение (23,4 кВт) и не должен использоваться в инженерной практике для расчёта реального энергопотребления.
4. Ключевой вывод для нормативной базы: ни один из существующих методов не позволяет без поправочных коэффициентов точно

рассчитать фактическую нагрузку на этапе испытаний или эксплуатации. В Российской Федерации отсутствуют актуальные нормативные документы, регламентирующие выбор коэффициентов загрузки для современных серверных платформ. Это создаёт риски как завышения (избыточное резервирование, перерасход средств), так и занижения (перегрузка вводов, аварии) при проектировании ЦОД и систем диспетчерского управления.

Список литературы:

1. ASHRAE TC 9.9. Thermal Guidelines for Data Processing Environments – 5th ed. – Peachtree Corners: ASHRAE, 2021. – 212 p. – URL: https://www.ashrae.org (дата обращения: 06.06.2026).
2. ANSI/TIA-942-C. Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers [Электронный ресурс] / Telecommunications Industry Association. – Arlington : Telecommunications Industry Association, 2024. – 186 p. – URL: https://www.tiafotc.org/tia-standards-update/tia-942-c/ (дата обращения: 07.06.2026).
3. IEC 60364-5-55:2011. Low-voltage electrical installations – Part 5-55: Selection and erection of electrical equipment – Other equipment [Электронный ресурс]. – Geneva: IEC, 2011. – 53 p. – URL: https://webstore.iec.ch/en/publication/1884 (дата обращения: 07.06.2026).
4. ISO/IEC 22237-1:2021. Information technology – Data centre facilities and infrastructures – Part 1: General concepts. – Geneva: ISO, 2021. – 32 p. – URL: https://www.iso.org/standard/78550.html (дата обращения: 06.06.2026).
5. ГОСТ Р 70139-2022. Центры обработки данных. Инженерная инфраструктура. Классификация [Электронный ресурс]. – Москва: Стандартинформ, 2022. – 70 с. – (Действие приостановлено до 31.12.2025). – URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/78026/ (дата обращения: 07.06.2026).
6. Росстандарт отменил ГОСТ по классификации дата-центров // Habr. – 20.12.2023. – URL: https://habr.com/ru/companies/dcmiran/news/781666/ (дата обращения: 24.05.2026).
7. СП 31-110-2003. Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий. – М.: Госстрой России, 2004. – 37 с.
8. Электрооборудование жилых и общественных зданий. Нормы проектирования ВСН 59-88 / Госкомархитектуры. – М.: Стройиздат, 1990. – 88 с.

СП 256.1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа. – М.: Минстрой России, 2016. – 79 с.

УДК 004.89

Дувалов В. С.
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ NER В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ РЕЗЮМЕ

Аннотация. В работе рассматриваются методы распознавания именованных сущностей (NER) применительно к задаче интеллектуального анализа резюме. Анализируются четыре основных подхода к реализации: глубинное обучение на основе трансформерных моделей, классическое машинное обучение с использованием библиотеки spaCy, создание пользовательских моделей с дообучением на отраслевых данных, а также применение готовых облачных API. Показано, что адаптация предварительно обученных моделей позволяет распознавать до восьми типов сущностей, включая профессиональные навыки, наименования должностей, уровень образования и географические наименования. Отмечается, что выбор конкретного метода определяется требуемой точностью, доступными вычислительными ресурсами и необходимостью сохранения конфиденциальности обрабатываемых персональных данных.

Ключевые слова: распознавание именованных сущностей, интеллектуальный анализ резюме, глубокое обучение, трансформерные модели, машинное обучение, spaCy, облачные API, извлечение информации.

Современный рынок труда характеризуется значительным объемом кадрового документооборота. По данным аналитических исследований, на отдельную вакансию может поступать несколько сотен откликов, что создает существенную нагрузку на специалистов по подбору персонала. Традиционные методы ручного анализа резюме не только требуют значительных временных затрат, но и подвержены влиянию субъективного фактора, что может приводить к необъективной оценке кандидатов.

В ответ на указанные вызовы сформировалось направление интеллектуальной автоматизации рекрутинговых процессов, базирующееся на использовании методов обработки естественного языка. В рамках данного направления одной из ключевых задач выступает извлечение структурированной информации из неструктурированных или слабоструктурированных текстов резюме. Эффективным инструментом решения этой задачи является технология распознавания именованных сущностей (named entity recognition, NER), которая относится к классу задач компьютерной лингвистики, заключающихся в выделении и классификации слов и словосочетаний, обозначающих именованные объекты, такие как люди,

организации, географические названия, даты и другие значимые элементы содержания [1].

В контексте компьютерной лингвистики под именованными сущностями понимается совокупность языковых единиц, указывающих на некоторого референта. Как отмечается в специальной литературе, категория именованных сущностей соотносится с традиционным понятием имени собственного, однако не ограничивается им, охватывая также числовые выражения, временные указатели и терминологические обозначения предметных областей. Задача распознавания заключается в автоматическом обнаружении в тексте таких единиц и отнесении их к предопределенным классам.

Выделение и классификация именованных сущностей могут осуществляться с применением различных методологических подходов, включая методы на основе словарей и правил, статистические методы, а также методы глубинного обучения. Проведенный анализ современного состояния исследований в этой области показывает, что в качестве базовых технологий лидируют методы глубинного обучения. Это обусловлено их способностью автоматически извлекать признаки из данных без ручного проектирования правил, а также высокой эффективностью при работе с большими объемами размеченных корпусов. При решении задачи распознавания сущностей широкое распространение получила схема разметки BIO, согласно которой каждому токену текста присваивается один из следующих тегов: B – начало именованной сущности, I – продолжение сущности, O – элемент, не относящийся ни к одной из выделяемых сущностей. Такая схема позволяет однозначно определять границы сущностей даже в случае их последовательного расположения в тексте.

Интеллектуальный анализ резюме представляет собой частный случай применения технологии NER, обладающий выраженной предметной спецификой. В отличие от задач распознавания сущностей в текстах общего назначения или новостных лентах, анализ резюме требует выделения таких специфических категорий, как профессиональные навыки, наименования должностей, реквизиты компаний-работодателей, уровни образования, сроки работы на предыдущих местах занятости [2].

При создании систем интеллектуального анализа резюме исследователи используют различные архитектурные подходы. Одним из наиболее проработанных решений является комбинированная модель, предложенная в магистерской диссертации, выполненной *во Львовской политехнике*. Данный подход интегрирует несколько математических моделей: TF-IDF для частотного анализа, BM25 для вероятностного поиска, GloVe для учета глобальных векторных представлений слов и Sentence-BERT для глубинного семантического сравнения контекста предложений. Для выделения

сущностей, в частности навыков и знаний, использовалась специализированная модель JobBERT. Итоговая оценка соответствия кандидата требованиям вакансии рассчитывается как взвешенная сумма результатов всех моделей после их нормализации к единому диапазону значений.

Важным результатом сравнительных исследований является вывод о превосходстве традиционных моделей на основе энкодеров над большими языковыми моделями при решении задачи извлечения навыков из текстов. В эксперименте, проведенном на русскоязычных данных, содержащих 4000 вакансий для обучения и 1472 для тестирования, модель DeepPavlov RuBERT NER показала более высокие результаты по таким метрикам, как точность, полнота и время логического вывода, по сравнению с большими языковыми моделями. Этот результат свидетельствует о том, что для узкоспециализированных задач извлечения информации применение специализированных моделей с относительно небольшим числом параметров оказывается не только более эффективным с вычислительной точки зрения, но и более точным [3].

В рамках реализации NER при анализе резюме сформировалось несколько основных методических подходов, различающихся по глубине кастомизации и требуемым вычислительным ресурсам. Первый подход основан на технологиях глубинного обучения и предполагает использование предварительно обученных трансформерных моделей, таких как RoBERTa или Electra, которые подвергаются донастройке на специализированных размеченных корпусах. Как показали результаты экспериментальных исследований, адаптация шести подобных моделей для обработки резюме в ИТ-сфере позволила системе устойчиво распознавать восемь типов сущностей, включая город, дату, уровень образования, специальность, наименование должности, язык, страну и профессиональный навык. Второй подход опирается на классические методы машинного обучения с применением библиотек вроде spaCy, что требует обучения на размеченных данных, но зачастую предъявляет более низкие требования к вычислительным ресурсам. Третий подход предполагает создание пользовательских моделей, дообучаемых на корпусах, точно отражающих лексику и сущности конкретной отрасли или должности – это позволяет существенно снизить количество ложных срабатываний и повысить точность выделения релевантных сущностей. Наконец, четвертый путь связан с использованием готовых облачных решений, таких как Azure Cognitive Service для языка или Google Cloud Natural Language API, которые дают возможность интегрировать функции NER в прикладные системы без самостоятельной настройки и обучения моделей, однако накладывают ограничения, связанные с передачей данных внешним сервисам и оплатой использования.

Несмотря на достигнутые успехи, применение технологии NER в анализе резюме сталкивается с рядом проблем и ограничений. Одной из ключевых проблем является дефицит эталонных размеченных наборов данных. Создание такого корпуса требует значительных временных и трудовых затрат, поскольку предполагает ручную разметку большого количества документов специалистами в предметной области. Для русскоязычных и украиноязычных резюме ситуация усугубляется отсутствием общедоступных стандартизированных корпусов, что затрудняет обучение и объективное сравнение различных моделей. Другой существенной проблемой выступает вариативность языковых формулировок, используемых соискателями для описания собственного опыта и навыков. Одна и та же профессиональная компетенция может быть обозначена десятками различных способов, что создает трудности для систем, опирающихся на фиксированные словари. Кроме того, резюме часто содержат специфическую терминологию, сокращения и аббревиатуры, значение которых не всегда может быть корректно определено моделью [4].

Высокие требования к вычислительным ресурсам также ограничивают практическое применение некоторых подходов, особенно в организациях с ограниченными техническими возможностями. Обучение и развертывание больших нейросетевых моделей требует наличия мощных графических ускорителей и значительного объема оперативной памяти, что может быть недоступно для небольших компаний.

Дальнейшее развитие технологии распознавания именованных сущностей в контексте интеллектуального анализа резюме связано с несколькими перспективными направлениями. Одним из них является создание гибридных систем, сочетающих методы глубинного обучения с подходами, основанными на правилах и лингвистических знаниях. Такое сочетание позволяет компенсировать недостатки каждого из подходов и повысить общую устойчивость системы. Важным направлением выступает разработка методов, учитывающих не только семантическое содержание текста, но и структурно-пространственную организацию документа. Современные модели, интегрирующие информацию о расположении текстовых блоков на странице, демонстрируют значительно лучшие результаты при обработке документов со сложной версткой по сравнению с моделями, работающими только с линейной последовательностью символов. Развитие технологий обучения с использованием ограниченного объема размеченных данных, включая перенос обучения и самообучение, также представляет значительный интерес для адаптации существующих моделей к новым предметным областям и языкам. Это особенно актуально для русскоязычного и украиноязычного сегментов рынка, где объем доступных размеченных данных остается ограниченным [5].

Проведенный анализ свидетельствует, что применение методов распознавания именованных сущностей в интеллектуальном анализе резюме является эффективным и перспективным инструментом автоматизации кадровых процессов. Современные модели на основе архитектуры трансформеров, в особенности специализированные реализации BERT, достигают высоких показателей точности и полноты извлечения структурированной информации, сопоставимых с экспертными оценками. Вместе с тем успешное внедрение таких систем в практическую деятельность сдерживается дефицитом размеченных корпусов для русского языка, вычислительной сложностью моделей и необходимостью их адаптации к вариативности языковых формулировок. Дальнейшее развитие технологии должно идти по пути создания гибридных подходов, интегрирующих глубинные нейросетевые архитектуры с лингвистическими правилами и структурным анализом документов, что позволит повысить устойчивость систем и расширить область их практического применения в рекрутинговых сервисах и кадровых службах организаций.

Список литературы:

1. Комарова Л. А., Колосов А. М., Соловьев В. И. Сопоставление векторных представлений вакансий и резюме с использованием больших языковых моделей // International Journal of Open Information Technologies. – 2025. – № 2. – С. 56–66. EDN: HMOSBB
2. Приходько А. В. Автоматизированный анализ резюме и ранжирование кандидатов с использованием NLP : магистерская диссертация. – Москва : Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2025. – URL: https://www.hse.ru/edu/vkr/1052910893 (дата обращения: 06.06.2026).
3. Вакурин В. С., Копылов А. В., Середин О. С., Мерцалов К. С. О многоклассовой классификации слов рекуррентной нейронной сетью с памятью (LSTM) применительно к задаче распознавания именованных сущностей // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020) : сборник трудов VI Международной конференции и молодежной школы. – Самара : Издательство Самарского университета, 2020. – Т. 4. – С. 956–968. EDN: CCEUZV
4. Mazitov D., Alimova I., Tutubalina E. Named Entity Recognition in Russian Using Multi-Task Long Short-Term Memory and Conditional Random Fields // Записки научных семинаров Санкт-Петербургского отделения Математического института имени В. А. Стеклова Российской академии наук. – 2021. – Т. 499. – С. 222–235. EDN: BEQQOJ
5. Собенин А. И. Задача распознавания именованных сущностей для клинических текстов : магистерская диссертация. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2023. EDN: HEUOGE

УДК 553.98

Мирхайдарова В. Р.
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

НЕТРАДИЦИОННЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ УГЛЕВОДОРОДОВ: ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ

Аннотация: Нетрадиционные коллекторы углеводородов: сланцевые породы, плотные песчаники, карбонатные трещинные породы. Их строение связано с микропоровой и трещинной структурой, определяющей фильтрацию флюидов. Характерна слабая связь пористости и проницаемости при высокой неоднородности порового пространства. Фильтрационные свойства зависят от связности пор и трещиноватости пород. Оценка требует комплексных лабораторных и геофизических методов.

Ключевые слова: нетрадиционные коллекторы, плотные песчаники, сланцевые породы, трещиноватость, пористость, проницаемость, фильтрационные свойства.

Нетрадиционные коллекторы углеводородов представляют собой породы с низкими фильтрационно-емкостными свойствами, в которых процессы накопления и фильтрации нефти и газа определяются не только межзерновой пористостью, но и развитием микропорового пространства и системы трещин. К таким объектам относят сланцевые породы, плотные песчаники и карбонатные коллекторы трещинного типа, формирование и свойства которых существенно отличаются от традиционных коллекторов [1].

Основной особенностью таких систем является слабая связь между классическими петрофизическими параметрами и реальной продуктивностью. Породы с близкими значениями пористости могут демонстрировать существенно различную проницаемость, что связано с различной степенью связанности порового пространства и наличием изолированных микропор [3]. В таких условиях фильтрация определяется не только объемом пор, но и их геометрией и связностью.

Сланцевые коллекторы отличаются тем, что значительная часть углеводородов находится в связанном или адсорбированном состоянии. Поровое пространство формируется преимущественно за счет нанопор, связанных с органическим веществом, которое одновременно выступает источником углеводородов и элементом структуры коллектора. Содержание органического углерода в породе и степень его преобразования контролируют развитие эффективной пористости и газонасыщенность пород [3].

Плотные песчаники характеризуются высокой степенью цементации и слабой связностью порового пространства. Фильтрация флюидов в таких породах определяется системой микротрещин, формирующих локальные зоны

повышенной проницаемости. Экспериментальные исследования керна показывают, что распределение трещиноватости носит неравномерный характер и связано с зонами тектонических напряжений, что приводит к формированию участков с резко различающимися фильтрационными свойствами [2].

Карбонатные трещинные коллекторы представляют собой сложные системы, в которых пустотное пространство формируется в результате сочетания первичной пористости и вторичных процессов – растворения, перекристаллизации и тектонических деформаций. В таких породах продуктивность часто определяется не усредненной пористостью, а наличием связанной трещинной сети, обеспечивающей фильтрацию флюидов [2].

Объединяющей особенностью всех типов нетрадиционных коллекторов является высокая пространственная неоднородность, проявляющаяся на различных масштабах. Это приводит к нарушению классических зависимостей между пористостью и проницаемостью и усложняет прогноз фильтрационных свойств.

Современные методы исследования основаны на комплексной интерпретации лабораторных, скважинных и геофизических данных. Керновые исследования позволяют изучать структуру порового пространства, но ограничены масштабом образцов. Геофизические методы дают непрерывную информацию по разрезу, однако требуют сложной интерпретации. Их совместное использование позволяет повысить достоверность оценки фильтрационно-емкостных свойств и уменьшить неопределенность геологических моделей [3].

Особое значение имеет анализ трещиноватости, поскольку именно она часто определяет промышленную продуктивность низкопроницаемых пород. Даже небольшое увеличение плотности трещин может приводить к резкому росту проницаемости, что указывает на пороговый характер фильтрационных процессов.

Дополнительным направлением является применение цифровых методов анализа геологических данных, включая реконструкцию порового пространства и статистическое моделирование фильтрационных свойств. Эти методы позволяют учитывать многомасштабную неоднородность и повышать точность прогноза коллекторских характеристик при корректной интерпретации исходных данных.

Практическая интерпретация особенностей нетрадиционных коллекторов основана на анализе типовых объектов, на которых отрабатываются современные методы оценки фильтрационно-емкостных свойств. Такие объекты включают сланцевые и плотные формации, где наблюдается сочетание низкой проницаемости и высокой структурной

неоднородности. На их примере формируются подходы к оценке роли микропорового пространства и трещиноватости в обеспечении фильтрации.

В мировой практике подобные исследования опираются на данные по сланцевым и плотным резервуарам Северной Америки и Китая, где комплексное изучение кернового материала, геофизических данных и результатов гидродинамических испытаний позволило уточнить механизмы фильтрации в низкопроницаемых средах. При этом установлено, что интерпретационные модели, разработанные для таких объектов, используются как базовые при анализе аналогичных коллекторов в других регионах.

Изучение известных объектов нетрадиционных коллекторов формирует основу для развития методических подходов к их оценке и адаптации геолого-геофизических методов к условиям высокой неоднородности пород.

Анализ показывает, что нетрадиционные коллекторы следует рассматривать как сложные многомасштабные системы, в которых фильтрационные свойства формируются совместным влиянием микропоровой структуры, трещиноватости и литологических особенностей пород. Основные трудности их изучения связаны с высокой неоднородностью и ограниченной возможностью прямого наблюдения внутреннего строения резервуаров. В этих условиях наиболее эффективным является применение интегрированных подходов, объединяющих лабораторные исследования, геофизические данные и цифровое моделирование, что позволяет повысить достоверность оценки и снизить неопределенность прогнозов. Анализ типовых и промышленных объектов позволяет уточнять интерпретационные подходы и повышать достоверность оценки коллекторских свойств.

Список литературы:

1. Jiang Z. X., Li Z., Li F. et al. Формирование и фильтрация газа в плотных песчаниках // Доклады по нефтяной науке. – 2015. – Т. 12. – С. 587–605. DOI: 10.1007/s12182-015-0061-6
2. Wang X., Li D. Плотные песчаники: особенности формирования и фильтрации // Научные исследования ресурсов. – 2024. – Т. 4. – С. 1–28. DOI: 10.50908/arr.4.1_1
3. Шустер В.Л., Пунанова С.А. Вопросы освоения нетрадиционных запасов углеводородов фундамента Западной Сибири и многокритериальная оценка перспектив его нефтегазоносности // Георесурсы. – 2014. – № 4 (59). – С. 53–58. DOI: 10.18599/grs.59.4.9.

УДК 004.8:004.912

Миссюра В. В., Капущенко Р. С.
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ АНАЛИЗА И КЛАСТЕРИЗАЦИИ КОММЕНТАРИЕВ ПОД ИНФОРМАЦИОННЫМ КОНТЕНТОМ

Аннотация. Статья посвящена разработке и сравнительному анализу алгоритмов машинного обучения для автоматической кластеризации комментариев, детектирования ботовой активности и распознавания AI-сгенерированных текстов на русском языке. Рассматриваются трансформерные модели (BERT, RuBERT), классические алгоритмы классификации и гибридные подходы. Предложена архитектура комплексного pipeline для анализа потоков комментариев с интеграцией в системы модерации через REST API.

Ключевые слова: машинное обучение, кластеризация комментариев, детектирование ботов, распознавание AI-текста, обработка естественного языка, BERT.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях цифровой трансформации коммуникаций комментарии под информационным контентом стали мощным инструментом формирования общественного мнения и одновременно – вектором информационных атак через массовое применение автоматизированных ботов и синтетических текстов, генерируемых языковыми моделями (LLM) [1]. Ручная модерация не справляется с объемами аномального контента, создавая риски манипуляции общественным сознанием и подрыва доверия к платформам. Применение методов машинного обучения (ML) позволяет автоматизировать процессы детектирования и анализа, выявляя скрытые паттерны координированных информационных кампаний.

Специфика комментариев – краткость высказываний, высокий лексический шум, контекстная зависимость и стремительная эволюция техник генерации синтетического контента – требует разработки специализированных архитектур, адаптированных под особенности морфологически богатого русского языка [2]. Цель исследования – разработка, сравнительный анализ и экспериментальная оценка алгоритмов ML для кластеризации комментариев, детектирования ботов и распознавания AI-сгенерированного текста.

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ КОММЕНТАРИЕВ

Детектирование ботовой активности. Для выявления ботов применяются три класса методов. Анализ текстовых признаков – стилометрических характеристик (TTR, длина предложений, частота повторов) – эффективен для примитивных ботов, однако уязвим к эволюции техник обхода [3]. Поведенческий анализ исследует временные паттерны активности и структуру графов

взаимодействий для выявления координированных сетей аккаунтов. Наилучшие результаты демонстрируют гибридные методы: комбинация лингвистических, поведенческих и сетевых признаков в ансамблевых классификаторах (Random Forest, XGBoost) [4].

Распознавание AI-сгенерированного текста. Синтетические тексты обнаруживаются по статистическим аномалиям: анализу perplexity, burstiness и распределений n-грамм, нехарактерных для органических текстов [5]. Более точный подход – fine-tuning предобученных трансформерных моделей (RuBERT, RuGPT) на корпусе из органических и синтетических комментариев, позволяющий выявлять латентные признаки AI-генерации [6].

Кластеризация комментариев. Семантические embeddings (BERT, Sentence-BERT) формируют основу для тематической группировки. Применяются алгоритмы DBSCAN и HDBSCAN для данных переменной плотности, K-Means с предобученными embeddings, а также иерархическая кластеризация для выявления вложенных топиков [7].

МЕТОДОЛОГИЯ И АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ

Исследование построено на принципах сравнительного анализа и итеративной разработки. Предложенный комплексный pipeline включает следующие этапы:

1. **сбор и предобработка данных** – формирование размеченного корпуса с метками (органический / бот / AI-сгенерированный), токенизация и лемматизация с учетом морфологии русского языка;
2. **инженерия признаков** – извлечение лингвистических (POS-теги, синтаксические структуры), стилометрических (TTR, длина, пунктуация), семантических (embeddings) и поведенческих признаков;
3. **разработка классификаторов** – обучение специализированных детекторов ботов и AI-текстов с калибровкой вероятностей и ablation study компонентов;
4. **реализация кластеризации** – семантическая группировка для выявления тематических кластеров, координированных кампаний и emerging topics;
5. **интеграция и оценка** – объединение модулей в единую систему с ансамблированием; метрическая оценка по Precision, Recall, F1-score, AUC-ROC.

Для преодоления дисбаланса данных применялись SMOTE, аугментация текста и focal loss [8]. Обучение проводилось с использованием стратифицированной кросс-валидации и hold-out тестовой выборки.

КЛЮЧЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

Среди основных проблем выделены: минимизация ложноположительных срабатываний при фильтрации органического контента; учет контекстной зависимости комментария от исходной публикации; кроссплатформенная адаптация алгоритмов; обеспечение интерпретируемости решений для модераторов. В качестве решений предложены механизмы continual learning для

адаптации к новым техникам генерации и ансамблевые подходы, снижающие число ошибок классификации. Прототип системы реализован с REST API для интеграции в системы мониторинга в режиме реального времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование систематизирует современные подходы к анализу комментариев и предлагает архитектуру комплексной ML-системы, интегрирующей кластеризацию, детектирование ботов и распознавание AI-текста. Ключевые выводы: трансформерные модели (RuBERT) превосходят классические алгоритмы для русскоязычных комментариев; гибридные признаки наиболее эффективны при детектировании ботов; адаптивные механизмы необходимы для противодействия эволюции методов синтетической генерации. Практическая ценность работы состоит в предоставлении рекомендаций по построению систем модерации для русскоязычных платформ с учетом требований к точности и скорости обработки.

Список литературы:

1. Ferrara E., Varol O., Davis C., Menczer F., Flammini A. The Rise of Social Bots // Communications of the ACM. – 2016. – Vol. 59, № 7. – P. 96–104. DOI: 10.1145/2818717
2. Delin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding // Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies (NAACL-HLT 2019). – 2019. – P. 4171–4186. DOI: 10.18653/v1/N19-1423
3. Chu Z., Gianvecchio S., Wang H., Jajodia S. Detecting Automation of Twitter Accounts: Are You a Human, Bot, or Cyborg? // IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. – 2012. – Vol. 9, № 6. – P. 811–824. DOI: 10.1109/TDSC.2012.75
4. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2016. – P. 785–794. DOI: 10.1145/2939672.2939785
5. Gehrmann S., Strobelt H., Rush A. M. GLTR: Statistical Detection and Visualization of Generated Text // Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. – 2019. – P. 111–117. DOI: 10.18653/v1/P19-3019
6. Kuratov Yu., Arkhipov M. Adaptation of Deep Bidirectional Multilingual Transformers for Russian Language [Электронный ресурс]. – 2019. –URL: https://arxiv.org/abs/1905.07213 (дата обращения: 06.06.2026).
7. Campello R. J. G. B., Moulavi D., Sander J. Density-Based Clustering Based on Hierarchical Density Estimates // Advances in Knowledge Discovery and Data Mining. – 2013. – P. 160–172. DOI: 10.1007/978-3-642-37456-2_14
8. Chawla N. V., Bowyer K. W., Hall L. O., Kegelmeyer W. P. SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique // Journal of Artificial Intelligence Research. – 2002. – Vol. 16. – P. 321–357. DOI: 10.1613/jair.953

УДК 004.89:339.1

Шелопаев Л. Л.
Научный руководитель: Ледовская Е. В., к.т.н., доцент
МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОИСКОВЫХ ЗАПРОСОВ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТОВАРА

Аннотация: В статье рассматриваются методы извлечения структурированных характеристик товара из коротких пользовательских запросов в системах электронной коммерции. Задача представлена как разметка последовательности в схеме BIO. Показаны особенности применения условных случайных полей, нейросетевой сверточной архитектуры Char-CNN-BiLSTM-CRF и трансформерной модели RuBERT-CRF для распознавания именованных сущностей в товарных запросах. Отдельное внимание уделено семантическому сопоставлению запроса и карточки товара на основе векторных представлений. Выполнен сравнительный анализ подходов по качеству выделения сущностей, устойчивости к шуму и вычислительным затратам.

Ключевые слова: семантический анализ, распознавание именованных сущностей, условные случайные поля, двунаправленная LSTM, трансформеры, векторные представления, товарный поиск.

1. Введение

В системах электронной коммерции пользователь формулирует потребность в виде короткого текстового запроса: «молоко домик в деревне 2.5% 1л», «кроссовки nike белые 42». В такой строке одновременно содержатся категория, бренд, числовые параметры и единицы измерения. Товарный каталог, напротив, структурирован по атрибутам. Задача семантического разбора состоит в преобразовании неструктурированного запроса в набор типизированных характеристик, пригодных для формирования точного запроса к поисковому индексу.

Товарные запросы обладают рядом свойств, затрудняющих обработку: малая длина (2–5 токенов), смешение кириллицы и латиницы, опечатки, многословные бренды («домик в деревне», «gloria jeans»), неоднозначность числовых токенов. В статье проводится обзор трех классов моделей извлечения сущностей: условные случайные поля (CRF), архитектура Char-CNN-BiLSTM-CRF и трансформерная модель RuBERT-CRF. Отдельно обсуждается семантическое сопоставление запроса с товарной карточкой и принцип построения гибридной системы поиска.

2. Формальная постановка задачи

Задача извлечения характеристик формализуется как разметка последовательности. Пусть $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – последовательность токенов

запроса. Требуется найти последовательность меток $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, где каждая метка принадлежит множеству L. Для набора типов сущностей E = {TYPE, BRAND, VOLUME, PERCENT} множество L определяется схемой BIO:

$$L = \{\text{B-e, I-e} \mid e \in E\} \cup \{O\}$$

Здесь метка B-e обозначает начало сущности типа e, метка I-e - продолжение этой сущности, а O соответствует токену, не принадлежащему ни одной сущности. Пример BIO-разметки изображен на Рисунке 1. Такая схема удобна для обработки многословных сущностей и позволяет отделять соседние сущности одного типа.

Пусть обучающая выборка имеет вид $D = \{(x^1, y^1), \dots, (x^N, y^N)\}$. Тогда задача обучения состоит в нахождении параметров θ, максимизирующих условное правдоподобие наблюдаемых меток при заданных входных последовательностях.

$$\theta^* = argmax_\theta \sum_i \log(p(y^i \mid x^i; \theta)).$$

Иными словами, модель должна назначать максимальную вероятность корректной разметке для каждого запроса из обучающей выборки.

3. Классический подход: правила и грамматический анализ

Одним из первых подходов к разбору товарных запросов является применение правил, словарей и регулярных выражений. Для каждого типа сущности формируются лексиконы и шаблоны: сущность VOLUME задается как число с единицей измерения, например мл, л, г, кг; сущность PERCENT – как число со знаком процента. Преимуществами такого подхода являются детерминированность, простота реализации и отсутствие необходимости в размеченных данных.

Однако правила слабо учитывают контекст. Например, слово «масло» может быть как частью бренда, так и общим обозначением типа товара. Без анализа окружения разрешить такую неоднозначность трудно. Поэтому в промышленных системах правила обычно используются как вспомогательный слой, который покрывает сущности, имеющие устойчивую текстовую форму, например объем, массу, процент или количество и компенсирует ошибки обучаемых моделей на редких или формализуемых классах.

Отдельная задача – преобразование качественных характеристик в количественные. Запрос «дешевый шампунь» может быть интерпретирован как ценовое ограничение на основе статистики товарной базы: вычисляется распределение цен в категории и определяется граница нижнего квартиля.

Такой подход полезен на прикладном уровне, но его трудно распространить на все классы сущностей без дополнительных моделей.

4. Условные случайные поля (CRF)

Условные случайные поля (Conditional Random Fields, CRF) представляют собой дискриминативную вероятностную модель для разметки последовательностей. В отличие от генеративных моделей, CRF напрямую описывают условное распределение $p(y|x)$, то есть вероятность последовательности меток при заданной последовательности токенов.

Для товарных запросов в CRF обычно используют признаки токена и его окружения: строку в нижнем регистре, короткие суффиксы, наличие цифр, тип регистра, принадлежность к словарям брендов и категорий, а также признаки соседних токенов. Декодирование оптимальной последовательности меток выполняется алгоритмом Витерби, а обучение возможно, например, методом L-BFGS с регуляризацией. Преимуществом CRF является интерпретируемость; ограничением – зависимость качества от вручную подобранных признаков.

5. Нейросетевые модели: Char-CNN-BiLSTM-CRF

Архитектура Char-CNN-BiLSTM-CRF автоматизирует извлечение признаков и сочетает три уровня обработки. На символьном уровне сверточная сеть по последовательности символов строит представление токена, устойчивое к опечаткам и нестандартным написаниям. Это особенно важно для товарных запросов, где пользователь может ввести, например, «nivia» вместо «nivea». Далее символьное представление объединяется со словесным вектором токена.

На следующем уровне двунаправленная рекуррентная сеть LSTM формирует контекстные представления токенов, учитывающие как левый, так и правый контекст. Для токена с номером t получаем выражение

$$ht = [\overrightarrow{LSTM}(x_1, \ldots, x_t);\ \overleftarrow{LSTM}(x_n, \ldots, x_t)]$$

Вектор ht объединяет информацию о токенах слева и справа от текущей позиции. Благодаря этому модель лучше различает роль слова в зависимости от контекста.

На верхнем уровне применяется CRF-декодер, который обеспечивает согласованность итоговой разметки. Оценка последовательности вычисляется по формуле

$$S(x, y) = \sum_{t=1}^{n} A[y(t-1), y(t)] + \sum_{t=1}^{n} P[t, y(t)]$$

Здесь A – матрица переходов между метками, а $P[t, y(t)]$ – оценка совместимости метки $y(t)$ с токеном t, полученная из линейного слоя над выходом BiLSTM. Обучение ведется по отрицательному логарифму правдоподобия корректной последовательности.

По сравнению с обычным CRF такая архитектура лучше работает на шумных данных, поскольку часть признаков извлекается автоматически. При этом вычислительные затраты и требования к объему обучающей выборки заметно возрастают.

6. Трансформерные модели: RuBERT-CRF

Модель BERT формирует контекстные представления токенов с помощью механизма многоголового самовнимания (Multi-head attention). Для каждого токена строятся векторы запроса Q, ключа K и значения V. На их основе вычисляется матрица внимания, задающая вклад остальных токенов в представление текущего слова.

$$Attention(Q, K, V) = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right) \cdot V,$$

где dk – размерность вектора ключа.

Деление на $\sqrt{dk}$ уменьшает риск чрезмерной концентрации распределения softmax при больших размерностях.

В задаче распознавания сущностей удобно использовать русскоязычную модель RuBERT, предобученную на большом корпусе текстов. Для решения прикладной задачи поверх выходов трансформера добавляется линейный слой, преобразующий скрытое представление токена в оценки по всем классам разметки, а затем – CRF-декодер.

Особенностью BERT является WordPiece-токенизация. Одно слово может быть разбито на несколько частей, поэтому метка сущности назначается только первому субтокену, а остальные позиции маскируются при обучении. Модели трансформеров, как правило, обеспечивают наилучшее качество на контекстно-зависимых сущностях, однако требуют существенно больших вычислительных ресурсов и увеличивают задержку обработки запроса.

Таким образом, модели имеют совершенно разную архитектуру и отличаются своей сложностью. Предполагается, что в разных условиях модели будут показывать свои сильные и слабые стороны.

7. Векторные представления и семантическое сопоставление

Извлечение сущностей не исчерпывает задачу товарного поиска. Необходимо также сопоставить запрос пользователя с карточкой товара в целом. Для этой цели применяются модели, формирующие векторные представления коротких текстов. В частности, Sentence-BERT использует

сиамскую архитектуру и позволяет сравнивать запрос и описание товара в одном векторном пространстве.

$$sim(q,d) = \frac{v_q \cdot v_d}{\|v_q\| \cdot \|v_d\|},$$

гдеv_q и v_d – векторные представления запроса q и документа d соответственно;

$sim(q,d)$ – косинусная мера близости между q и d.

Чисто семантическое сопоставление способно повысить качество ранжирования, однако у него есть важное ограничение: модель может признать близкими по смыслу товары, которые не удовлетворяют строгим числовым ограничениям пользователя. Поэтому на практике семантическая модель чаще используется не изолированно, а в комбинации с лексическим поиском и атрибутной фильтрацией.

Лексический поиск, например на основе BM25, обеспечивает базовую полноту выдачи и быстро находит документы с совпадающими словами. Семантическая модель используется на этапе повторного ранжирования, когда нужно уточнить порядок документов в верхней части списка.

8. Гибридная архитектура системы товарного поиска

С практической точки зрения наиболее обоснованным является гибридный подход. На первом этапе ML-сервис выполняет BIO-разметку пользовательского запроса с помощью NER-модели: CRF, Char-CNN-BiLSTM-CRF или RuBERT-CRF. Параллельно работает резервный модуль на регулярных выражениях, который выделяет сущности VOLUME и PERCENT по устойчивым шаблонам и тем самым компенсирует ошибки основной модели на редких классах.

После извлечения сущностей структурированные признаки передаются на серверную часть приложения. Далее формируется запрос к поисковому индексу Elasticsearch или OpenSearch: бренд используется как фильтр по значению атрибута, объем и процент – как числовые ограничения, а тип товара – как категория и дополнительный сигнал для ранжирования. Такой подход одновременно повышает точность отбора и сохраняет преимущества полнотекстового поиска.

На Рисунке 1 изображен пример использования гибридной архитектуры для системы товарного поиска, обладающий как простыми словарями и полнотекстовым поиском, так и сложными NER моделями, помогающими при ошибках пользователя и сложных запросах.

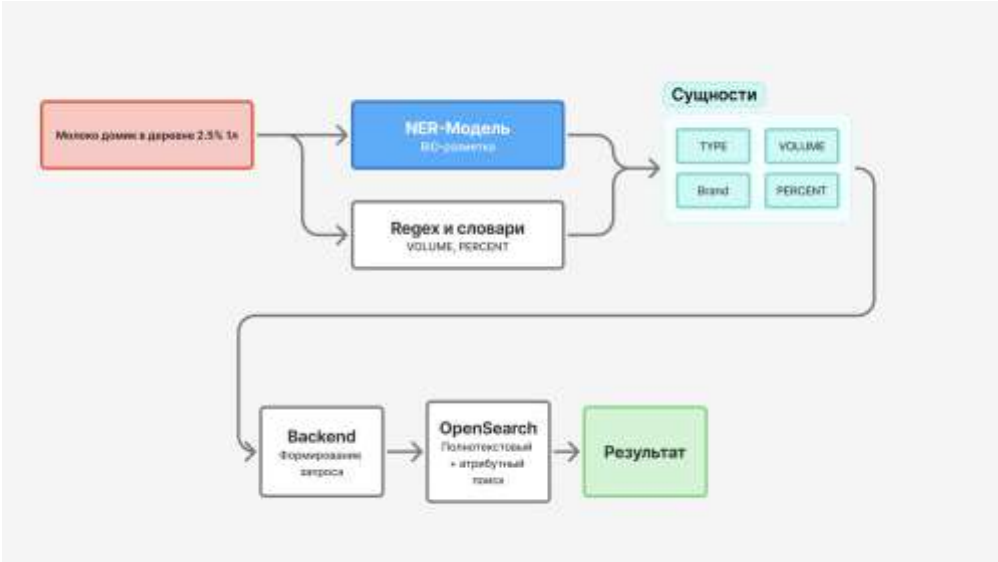


Рисунок 1. Архитектура системы семантического товарного поиска

В пользовательском интерфейсе распознанные сущности могут быть подсвечены, чтобы дать пользователю обратную связь о том, как именно система интерпретировала запрос. Архитектура остается модульной: модель машинного обучения развертывается и масштабируется независимо от серверной части, а обновление модели не требует переработки всей системы.

9. Сравнительный анализ и заключение

Сравнение рассмотренных методов показывает, что каждый из них решает свою часть задачи. Правила и регулярные выражения полезны для строго формализуемых шаблонов. CRF является хорошей базовой моделью при ограниченном объеме данных и требованиях к интерпретируемости. Архитектура Char-CNN-BiLSTM-CRF более устойчива к опечаткам и шумным пользовательским запросам за счет символьного кодирования. RuBERT-CRF обеспечивает наилучшее качество на контекстно-зависимых сущностях, но предъявляет самые высокие требования к ресурсам.

На Таблице 1 изображено окончательное сравнение характеристик и качеств рассматриваемых подходов, включая гибридный, который по мнению авторов является наиболее подходящим для современной задачи поиска именованных сущностей.

Таблица 1 – Сравнение характеристик и качеств подходов

Критерий	**Правила**	**CRF**	**Char-CNN-BiLSTM-CRF**	**RuBERT-CRF**	**Sentence-BERT**	**Гибридный подход**
Учет контекста	Отсутствует	Локальный контекст	Двусторонний контекст	Глобальный контекст	На уровне всего текста	На нескольких уровнях
Устойчивость к шуму	Низкая	Низкая	Высокая	Средняя	Средняя	Высокая
Вычислительная сложность	Низкая	Умеренная	Выше средней	Высокая	Высокая	Высокая
Требования к данным	Не требуются	Небольшие	Средние	Средние и большие	Большие	Средние и большие
Преимущество	Простота и предсказуемость	Интерпретируемость	Устойчивость к опечаткам	Лучшее качество по контексту	Хорошо ранжирует по смыслу	Баланс точности и практичности

Для промышленных систем товарного поиска наилучшим решением представляется гибридная схема, сочетающая обучаемую модель распознавания сущностей, детерминированный слой правил для устойчивых шаблонов и структурированный запрос к поисковому индексу. Такой подход позволяет распределить роли между компонентами и снизить ограничения, присущие каждому отдельному методу.

Перспективными направлениями дальнейшей работы являются экспериментальное сравнение моделей по F1-мере на уровне сущностей, оценка качества поиска по метрикам mAP и NDCG, расширение набора распознаваемых типов и нормализация атрибутов товара для последующей фильтрации и ранжирования.

Список литературы:

1. Краснов Ф. В. H1: гибридная система извлечения информации для поиска товаров в электронной торговле // Труды ИСП РАН. – 2024. – Т. 36, № 5. – С. 227–240. DOI: 10.15514/ISPRAS-2024-36(5)-16 EDN: NYNMNC

2. Lafferty J., McCallum A., Pereira F. C. N. Conditional Random Fields: Probabilistic Models for Segmenting and Labeling Sequence Data // Proceedings of the Eighteenth International Conference on Machine Learning (ICML). – 2001. – P. 282–289.

3. Ma X., Hovy E. End-to-end Sequence Labeling via Bi-directional LSTM-CNNs-CRF // Proceedings of ACL. – 2016. – P. 1064–1074. DOI: 10.18653/v1/P16-1101

4. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding // Proceedings of NAACL-HLT. – 2019. – P. 4171–4186. DOI: 10.18653/v1/N19-1423

5. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks // Proceedings of EMNLP-IJCNLP. – 2019. – P. 3982–3992. DOI: 10.18653/v1/D19-1410

6. Robertson S. E., Zaragoza H. The Probabilistic Relevance Framework: BM25 and Beyond // Foundations and Trends in Information Retrieval. – 2009. – Vol. 3, No. 4. – P. 333–389. DOI: 10.1561/1500000019

7. Kozareva Z., Li Q., Zhai K., Guo W. Recognizing Salient Entities in Shopping Queries // Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL). – Berlin, Germany, 7–12 August 2016. – P. 107–111.

8. Ricatte T., Crisostomi D. AVEN-GR: Attribute Value Extraction and Normalization using Product Graphs // Proceedings of the ACL Industry Track. – 2023. – P. 126–133. DOI: 10.18653/v1/2023.acl-industry.14

9. Agrawal S., Sembium V. RTSM: Knowledge Distillation with Diverse Signals for Efficient Real-Time Semantic Matching in E-Commerce // Proceedings of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies (NAACL-HLT), Industry Track. – 2025. – P. 9–19. – DOI: 10.18653/v1/2025.naacl-industry.2

УДК 621.951.025

Савин А. А.
Научный руководитель: Исаев А. В., к.т.н., доцент
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия

ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ИЗ СПЛОШНОГО МАТЕРИАЛА ПО МЕТОДУ КОЛЬЦЕВОГО СВЕРЛЕНИЯ

Аннотация. Статья посвящена разработки методики проектирования инструмента для получения заготовок цилиндрической формы из сплошного материала по методу кольцевого сверления. Заготовки для деталей изготавливаемые из оловянистой бронзы получают методом литья через стальной кокиль в виде цилиндра диаметром 150 мм и длиной 80 мм. В статье описана конструкция инструмента, представляющая собой тонкостенную коронку из стали, с напаянными режущими зубьями из твердого сплава. Для обеспечения лучшего отвода стружки на корпусе сверла выполнены наружные стружкоотводящие каналы.

Ключевые слова: глубокое сверление, кольцевое сверло, схема резания, проектирование режущих инструментов.

Введение. Детали для особо ответственных механизмов в авиационной промышленности, работающие на трении, изготавливаются из антифрикционных материалов. Одним из них является оловянно-свинцовая бронза БрО10С2Н3 ОСТ 1 90054-72, которая представляет собой сплав меди с оловом, а также с добавками свинца, никеля и других примесей, содержание которых менее 1% [3]. Основным назначением деталей, изготовляемых из оловянистых бронз, является их применение в агрегатах топливно-регулирующих и гидравлических систем авиационной техники, газотурбинных двигателей бронетанковой и специальной наземной техники. Существующий метод получения заготовок из литья является трудоемким, что свидетельствует о необходимости замены базового технологического процесса на более производительный способ получения заготовок полуфабрикатов, что является актуальным вопросом в машиностроении.

Основная часть. Заготовки для последующей механической обработки из литья медного сплава БрО10С2Н3 необходимо изготовить в виде цилиндрических стержней диаметром от Ø15 до Ø50 мм (рисунок 1). Служебным назначением оловянно-свинцовой бронзы является изготовление таких деталей как втулки, башмаки, шайбы и т.д., применяемые в авиастроении работающие на трение.

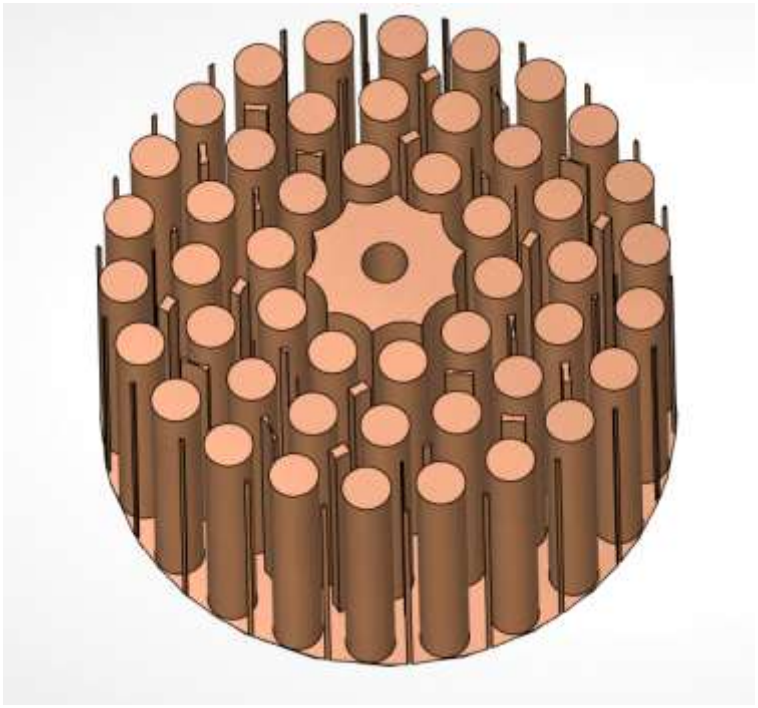


Рисунок 1 – Стержневые заготовки-полуфабрикаты

Медный сплав БрО10С2Н3 по ОСТ 1 90054-72 получают способом литья через толстостенный стальной кокиль [3]. Бронзами называют сплавы меди, в которых цинк или никель не является основными легирующими элементами. Оловянными бронзами называются сплавы, в которых олово является основными легирующим элементом. В оловянной бронзе Бр010С2Н3 содержится, помимо меди, 9–11 % олова, 2–3 % свинца, 3–4 % никеля и примеси (Sb, Fe, Al, Zn). Механические свойства сплава представлены в таблице 1 [3].

Таблица 1. Механические свойства сплава Бр010С2Н3

Марка сплава	Способ литья	Механические свойства, не менее		
		Временное сопротивление разрыву, кгс/мм^2	Относительное удлинение, %	Твердость по Бринеллю, НВ, кгс/мм^2
БрО10С2Н3	кокиль (к)	30	5	90

Базовый вариант является трудоемким процессом получения заготовок-полуфабрикатов, который включает в себя операцию «электроэрозионная», с применением проволочно-вырезного станка (рисунок 2), в качестве режущего инструмента здесь выступает латунная проволока. Преимущество данного метода заключается в массе отходов в стружку, которая составляет примерно

35% от общей массы заготовки. Машинное время для получения одного стержня составляет 18 минут.

Рисунок 2 – Операция электроэрозионная

В связи с увеличенной трудоемкостью было принято решение о переходе на новую технологию. На рисунке 3 показан проектный вариант, в котором применяется горизонтально-обрабатывающий центр, в котором в качестве режущего инструмента, выступает экспериментальное кольцевое сверло из быстрорежущей стали Р18. Преимущество данного варианта – сокращенное машинное время, которое составляет 2,5 минуты на один стержень.

Рисунок 3 – Операция на станке с ЧПУ

Во время проведения натурного эксперимента получения заготовок по методу кольцевого сверления были выявлены следующие недостатки в виде износа режущей кромки (рисунок 4, а), скол режущего зуба (рисунок 4, б), а также излом хвостовой части сверла (рисунок 4 в).

а б

в

Рисунок 4 – Износ инструмента:
а - износ режущей кромки; *б* – скол режущего зуба; *в* – излом хвостовой части

На основе полученных результатов, была разработана новая конструкция кольцевого сверла, которая показана на рисунке 5. Конструкция представляет собой корпус из конструкционной легированной стали 30ХГСА с режущими зубьями из твердого сплава ВК8 [1]. Также для обеспечения лучшего отвода стружки на корпусе сверла выполнены наружные стружкоотводящие каналы [12].

Рисунок 5 – 3D-модель кольцевого сверла

Было проведено исследование разработанной новой конструкции кольцевого сверла на прочность по методу конечных элементов (МКЭ) в программе T-FLEX CAD. На рис. 6 показан коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям. По цвету можно понять, что самые высокие напряжения наблюдаются в области резьбовой части сверла. Вверху шкалы показано его значение, которое составляет 1.8%, что свидетельствует о работоспособности технического решения.

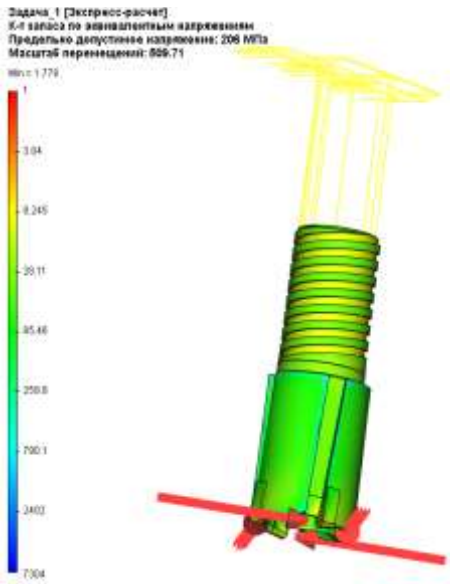


Рисунок 6 – Коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям

На рисунке 7 показаны угловые перемещения узлов конечных элементов относительно оси сверла. Максимальное значение показано вверху шкалы, и составляет 5,52 мкм или около 0,005 мм, что является допустимым.

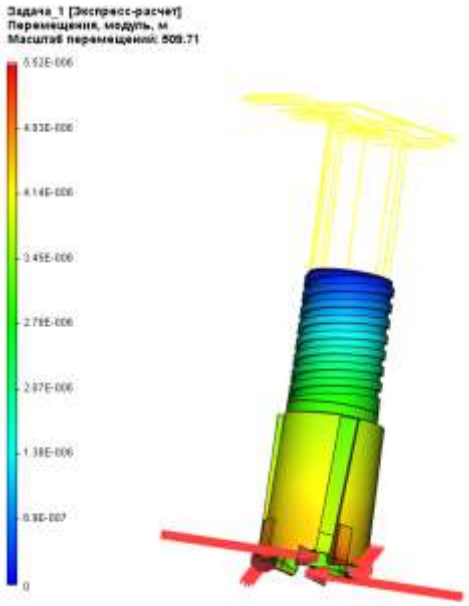


Рисунок 7 – Угловые перемещения

При проектирование кольцевого сверла для вырезания заготовок, необходимо учитывать ширину среза. Выбор ширины среза является одним из основных вопросов при конструировании тонкостенных головок.

При определении ширины среза следует иметь в виду ряд взаимосвязанных факторов:

1. наименьшая ширина среза дает наибольшую экономию металла и наименьшую затрату на электроэнергию, а также уменьшает нагрузку на режущую кромку сверла в связи уменьшением площади резания;

2. более жесткая и прочная конструкция головки кольцевого сверла;

3. необходимость создания наиболее благоприятных условий отвода стружки из зоны резания с учетом современного состояния проблемы разделения или дробления ее.

Выбор самой ширины среза находится в зависимости от диаметра высверливаемого стержня. Для диапазона высверливаемых стержней длиной от 50 мм до 100 мм и диаметров Ø15 мм до Ø30 мм может быть рекомендована следующая формула расчета ширины среза:

$$B = 0.05dc + 3,$$

где B – ширина среза;

dc – диаметр высверливаемого стержня.

Для стержней диаметром от Ø30 мм до Ø50 мм может быть рекомендована следующая формула расчета:

$$B = 0.03dc + 4,$$

С увеличением длины сверления возникают трудности при изготовлении оправки, связанные с прямолинейностью и соосности ее

внутреннего и наружного диаметров. При увеличении длины высверливания не малую роль будет играть также жесткость системы.

Для определения ширины среза в зависимости от длины высверливания при кольцевом сверлении от 100 мм до 200 мм и диаметре высверливания от Ø15 мм до Ø30 мм рекомендуется формула:

$$B = (0.05dc + 3) * L_{св}^{0.05},$$

где Lсв – длина высверливаемого стержня.

Для стержней диаметром Ø30 мм до Ø50 мм и длиной высверливания от 100 мм до 200 мм может быть рекомендована следующая формула:

$$B = (0.03dc + 4) * L_{св}^{0.05},$$

В таблице 2 представлен диапазон выбора ширины среза высверливаемых стержней длиной от 50 мм до 100 мм и диаметров Ø15 мм до Ø50 мм, а в табл. 3 представлен диапазон выбора ширины среза высверливаемых стержней длиной от 100 мм до 200 мм и диаметров Ø15 мм до Ø50 мм [12].

Таблица 2 – Выбор ширина среза при глубине резания от 50 мм до 100 мм

Диаметр стержня, мм	15	20	25	30	35	40	45	50
Ширина реза, мм	3,7	4	4,2	4,5	5	5,2	5,5	6

Таблица 3 – Выбор ширина среза при глубине резания от 100 мм до 200 мм

Диаметр стержня, мм	15	20	25	30	35	40	45	50
Ширина реза, мм	4,8	5,2	5,5	5,8	6,5	6,8	7	7,2

Заключение. В результате перехода на новую технологию с применением кольцевого сверла производительность получения заготовок по методу кольцевого сверления выросла в 8 раз по сравнению с технологией электроэрозионной обработки. Также можно утверждать, что метод кольцевого сверления является актуальной и перспективной тематикой для его дальнейшего изучения.

Список литературы:

1. ГОСТ 1050-2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. Введ. 01.01.2015. Взамен ГОСТ 1050-88. Москва: Стандартинформ, 2014. – 36 с.
2. ГОСТ 25393-90 Пластины твердосплавные напаиваемые для режущего инструмента. Типы. Введ. 01.07.1993. Москва: Стандартинформ, 2006. – 8 с.
3. ГОСТ 1 90054-72. Сплавы медные для литья. Разработан ВИАМ. Утвержден 01.09.1972. – 5с.
4. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов и режущий инструмент. Изд 3-е, перераб и доп. Учебник для машиностроительных техникумов. М.: Машиностроение, 1976. – 410 с. с ил.

5. Иноземцев Г.Г., Проектирование металлорежущих инструментов М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.: ил.

6. Кирсанов Г.Н., Арбузов О.Б., Боровой Ю.Л., Гречишников В.А., Киселев А.С., Лапинский М.Ю., Ласточкин С.С., Сахаров Г.Н., Седов Б.Е., Султанов Т.А. / Руководство по курсовому проектированию металлорежущих инструментов: Учеб. пособие для вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты/Под общ. Ред. Г.Н. Кирсанова – М.: Машиностроение, 1986. - 288 с.: ил.

7. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты. Издательское объединение «Вища школа», 1973. – 399 с.

8. Сахаров Г.Н. и др. Металлорежущие инструменты: Учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения», «Металлорежущие станки и инструменты»/Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.: ил.

9. Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н. Проектирование металлорежущих инструментов. М.: МАШГИЗ, 1963. – 955 с.

10. Троицкий Н.Д. Глубокое сверление. Л.: Машиностроение, 1971. – 176 с.

11. Уткин Н.Ф., Кижняев Ю.И., Плужников С.К. и др. Обработка глубоких отверстий. М.: Машиностроение, 1988. – 269 с.: ил.

12. Черничкин С.А. Кольцевое сверление и обработка глубоких отверстий. М.: Машиностроение, 1964. - 239 с.

13. Шагун В.И. Режущий инструмент: Проектирование, Производство, Эксплуатация: Учеб. пособие / В.И. Шагун – Минск: НПООО «ПИОН», 2002 – 495 с.

14. Юликов М.И. и др. Проектирование и производство режущего инструмента/М.И. Юликов, Б.И. Горбунов, Н. В. Колесов. – М.: Машиностроение, 1987. – 296 с.: ил.

УДК 656.025.4:75

Кашин М. К.
Научный руководитель: Панюшкина А. А., ассистент
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПАКОВКИ И МЕТОДИКИ ТРАНСПОРТИРОВКИ КАРТИН С НЕВЫСОХШИМ ЖИВОПИСНЫМ СЛОЕМ

Аннотация. рассматривается проблема транспортировки картин с невысохшим масляным красочным слоем. Систематизированы принципы выбора тары и упаковки, восполняющие отраслевой пробел. Цель – разработка оптимальной упаковки и поэтапной методики транспортировки, минимизирующей механические и климатические риски. Методика базируется на анализе физико-химических свойств масляных красок. Предложена система, обеспечивающая защиту поверхности. Выдвинута гипотеза об использовании управляемого светодиодного излучения для предотвращения пожелтения масел в темноте. Результаты применимы логистическими компаниями и галереями.

Ключевые слова: Логистика произведений искусства, транспортировка живописи, упаковка грузов, картины с невысохшим слоем, диффузионная мембрана, полимеризация масел.

Введение

Из-за высокого объема мировой торговли перевозчики сталкиваются с необходимостью обеспечения доставки различных товаров, зачастую, имеющих характеристики, которые могут вызвать трудности уже на моменте упаковки. Одним из таких товаров можно назвать картины с невысохшим красочным слоем.

Связано это с уязвимостью поверхности к потенциальному механическому и температурному воздействию. Помимо этого, невысохшие «сырые» картины могут источать едкий запах, который может быть обусловлен использованием вспомогательных жидкостей, используемых при написании работ.

Учитывая вышесказанное, неправильно подобранная упаковка может привести не только к повреждению картин: размазыванию красочного слоя, образованию кракелюра, деформации холста, либо иной основы, на которой расположена краска, к отслоению живописного слоя, но и к пропитке других товаров, перевозимых совместно с картинами едким запахом.

Цель данного исследования: Систематизация принципов и методов выбора тары и упаковки, обеспечивающих сохранность «сырых» картин, а также товаров, потенциально перевозимых вместе с ними.

Основная часть

Краска представляет собой смесь пигмента и связующего вещества. В составе также могут присутствовать и иные компоненты в незначительных концентрациях, но в данном исследовании такие материалы рассмотрены не будут.

Существует множество разновидностей красок для применения в сфере живописи, но основными выделяют 5 разновидностей:

- акварельные;
- гуашевые;
- акриловые;
- масляные;
- темперные.

Процесс отверждения почти всех видов краски происходит за счет испарения воды или быстрой полимеризации (акрил), «высыхание» же масляной краски представляет собой скорее процесс окисления – под действием кислорода молекулы жирных кислот в масле соединяются, образуя поверхностную пленку – из-за тесного контакта с кислородом вначале полимеризуется поверхность. Эта пленка препятствует доступу кислорода в нижележащие слои масла, вследствие чего процесс высыхания заметно замедляется. Спустя некоторое время в пленке образуются микроскопические отверстия (из-за испарения летучих составляющих масла), благодаря которым кислород поступает внутрь слоя, провоцируя полимеризацию. Одновременно с этим начинается процесс уменьшения масла в объеме, сопровождающееся сморщиванием поверхностной пленки, причем в процессе дальнейшей полимеризации в слое образуются пустоты. Этот процесс исключительно длителен (от нескольких месяцев до года и более для полного завершения) и требует стабильного доступа к кислороду, что предъявляет специфические требования к условиям транспортировки: упаковка должна обеспечивать газообмен, одновременно защищая уязвимую поверхность от механических воздействий и перепадов влажности.

Данное исследование будет сконцентрировано лишь на картинах, написанных масляной краской, так как при базовом нанесении без использования «летучих» вспомогательных жидкостей в больших концентрациях, при классическом использовании вместе с основным вспомогательным материалом – льняным маслом, лишь она сохнет продолжительное время:

- тонкие слои сохнут приблизительно 5 дней;
- толстые слои сохнут от нескольких недель до нескольких месяцев;
- полное высыхание занимает от 6 до 12 месяцев.

Остальные же виды красок, из представленных выше сохнут значительно быстрее, это обусловлено использованием вместе с водой, либо

эмульсиями и растворителями, которые сохнут непродолжительное время. Стоит отметить, что краска на основе акрила допускает совместное использование с водой, эмульсиями и растворителями, но высокая скорость высыхания обусловлена здесь не столько скоростью испарения вспомогательных жидкостей, сколько высокой скоростью полимеризации самого акрила.

При использовании специализированных жидкостей период высыхания масла можно также значительно уменьшить, но такие вещества чаще всего не используют, либо используют в малых концентрациях. В некоторых случаях при использовании других разновидностей краски, (например, краски на основе акрила) используют замедлители высыхания (ретардеры), но даже при их использовании, срок высыхания не будет таким же продолжительным, как у краски на основе масла, в связи с чем рассмотрение их в контексте данного исследования лишено смысла.

При выборе упаковки для картин с невысохшим красочным слоем необходимо учитывать вероятные воздействия: механического характера – даже легкое касание приведет к порче красочного слоя; климатические – перепады температуры могут вызвать появление трещин на живописном слое (кракелюра), а повышенная влажность привести к образованию плесени. Оптимальными показателями для «сырых картин» принято считать температуру от +18 до +22 и влажность 40-60%.

Помимо этого, стоит также учитывать, что, если картина, написанная маслом, весь период высыхания находится в темноте без воздействия света, она будет не только сохнуть значительно дольше, но и по высыхании, возможно, приобретет желтый оттенок. Это обусловлено фактом наличия в составе краски льняного, либо другого вида масла, которое имеет желтый оттенок, разрушаемый солнечными лучами, но, иногда, видимый на светлых картинах, либо их участках в случае, если картина сохла без доступа света.

Для перевозки картины с невысохшим живописным слоем необходима рама, либо же рейки или уголки. Рейки крепят к внешним краям подрамника (если подрамник есть, в случае его отсутствия необходимо закрепить холст на картоне и крепить рейки к нему) так, чтобы их верхний край был выше уровня красочного слоя, при таком креплении никакая часть защитной рамы не касается поверхности картины. В результате такого крепления получается защитный короб с открытым верхом.

После упаковки картины в короб собранная защитная конструкция полностью обтягивается диффузионной мембраной (например, Tyvek с плотностью 58 г/м² и паропроницаемостью Sd=0.015 м), которая выравнивает микроклимат и предотвращают образование конденсата и соединяет «крышку» короба с его основной частью. Она обеспечивает

газообмен и защиту от влаги. При необходимости (например, для дополнительной жесткости) поверх мембраны может быть закреплен лист перфорированного картона. Главные особенности диффузионной мембраны – водонепроницаемость и высокая пропускная способность. Данный материал предназначен, в том числе, для перевозки произведений искусства, он может защитить картины от повышенной влажности, но при этом позволить картине «дышать», что необходимо для ее высыхания.

Завершающим этапом упаковки картины является коробка. Для перевозки на недалекие расстояния можно использовать и картонные коробки, но обычно для транспортировки используют деревянные или фанерные упаковки. Главным условием является идеально подходящий размер – полученный короб из защитной рамы и диффузионной мембраны должен быть идеально зафиксирован внутри коробки, чтобы предотвратить какое-либо движение холста. Сам ящик снаружи часто имеет амортизирующие слои (пенопласт, пузырчатую пленку) для защиты от ударов и вибрации.

Полученная тара обеспечивает защиту от механического воздействия на живописный слой, так как между картоном, либо досками и картиной есть прослойка воздуха, помимо этого, деревянный ящик обеспечивает защиту от ударов. Диффузионная мембрана же обеспечивает защиту от переувлажнения, также позволяя краске дышать. Полученная тара для перевозки картин также будет защищать другие товары, которые могут перевозить совместно с картинами от запаха, так как ящики из дерева, либо фанеры впитывают запахи.

При перевозке картин в холодное время года необходимо наличие термоизоляции, так как краска твердеет на морозе. В случае же, если термоизоляция не предусмотрена, после температурных скачков необходимо нагревать, либо охлаждать картину медленно, нельзя сразу перенести работу из холодного транспорта в теплое место, так как в таком случае картину покроют трещины.

Необходимые условия внутри транспорта:

- температурные условия: В кузове транспортного средства должны поддерживаться оптимальные параметры температуры и влажности;
- крепление: Транспорт должен быть оборудован специальными стеллажами и ремнями, чтобы ящики с картинами не были подвержены вибрациям;
- аккуратное вождение: Водитель должен избегать резких торможений и поворотов.

Не рекомендовано: располагать картины без защитной рамы, уголков, либо реек; накрывать картину таким образом, чтобы диффузионный материал прилегал к живописному слою; перевозить картину без надлежащего

стеллажа, снижающего уровень вибраций; допускать температурные перепады.

При перевозке картин с невысохшей краской проблему отсутствия света при высыхании красочного слоя обычно игнорируют, для решения данной проблемы может быть рассмотрен вариант управляемого фотохимического воздействия. Использование узкополосного холодного излучения светодиодов (потенциально, иные разновидности ламп могут выделять больше тепла, чем светодиоды, что может навредить картине) определенного спектрального диапазона (например, сине-фиолетового) могло бы обеспечить направленное разрушение желтеющих соединений в масляной пленке без риска деформации красочного слоя во время транспортировки. Таким образом, свет будет разрушать структуру масла, избавляя его от желтого оттенка. Безусловно, необходимость в таком нововведении есть лишь для картин со светлыми участками, написанными с использованием большого количества масел, перевозимых на дальние расстояния.

Также следует отметить, что хоть это усложнение, которое создает риски (электропитание, нагрев, даже минимальный, механическое повреждение), хоть это предположение носит гипотетический характер и требует экспериментального подтверждения, но, несмотря на значительные технические сложности, реализация подобной системы могла бы стать качественным скачком в области транспортировки масляной живописи на сверхдальние расстояния. Помимо этого, можно снабдить ящики системой контроля температуры в случае, если есть необходимость перевозки в транспорте без температурного контроля.

Заключение

Проведенное исследование базировалось на фундаментальном отличии картин, написанных масляными красками от прочих – длительном высыхании живописного слоя, обусловленного особо длительным сроком полимеризации масла. Ключевые особенности транспортировки были определены необходимостью обеспечения газообмена и защите от механических, и климатических воздействий.

В результате были выделены и классифицированы основные риски, угрожающие сохранности груза, на основе которых была разработана и описана наилучшая система упаковки:

1. защитный каркас – рама, создающая воздушный слой и предотвращающая потенциальный контакт с другими поверхностями;
2. диффузионная мембрана (на основе материалов типа Tyvek), обеспечивающая газообмен, необходимый для корректного протекания процесса полимеризации;
3. жесткая внешняя тара (деревянный или фанерный ящик) с амортизацией, необходимая для защиты от ударов и вибрации.

Комплексное применение всех трех элементов в сочетании с соблюдением режима перевозки (температура +18…+22°C, влажность 40–60%, минимальная вибрация) позволит эффективно перевозить картины с невысохшим красочным слоем. Предложенная методика носит практический характер и может быть непосредственно применена логистическими компаниями, художниками и музеями для обеспечения сохранности произведений искусства.

В ходе работы было выявлено техническое ограничение – пожелтение масла при его полимеризации без доступа света. В качестве перспективы для дальнейших исследований была предложена гипотеза о потенциальном использовании направленного светового излучения для управляемого фотохимического воздействия на краску. Таким образом, настоящее исследование не только систематизирует существующие профессиональные решения, но и обозначает вектор для будущих разработок в области совершенствования транспортировки произведений искусства.

Список литературы:

1. Технология упаковки невысохших картин маслом [Электронный ресурс] // Art-packing.pro: сайт. – URL: https://art-packing.pro/info/useful/upakovka/upakovka-syrykh-kartin/ (дата обращения: 28.11.2025).
2. Диффузионная мембрана Tyvek Soft: технические характеристики и применение [Электронный ресурс] // Art-packing.pro: сайт. – URL: https://art-packing.pro/product/membrana/ (дата обращения: 29.11.2025).
3. Основные виды техники масляной [Электронный ресурс] // Ghenadie Sontu Fine Art : сайт. – URL: https://ghenadiesontu.squarespace.com/blog/oil-painting-techniques (дата обращения: 26.06.2025).
4. Mathez Art Logistics [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании. – URL: https://www.mathez-art-logistics.com/ru/ (дата обращения: 28.11.2025).
5. Гринько А. Технология масляной живописи. – Москва : Ridero, 2019. – 82 с. ISBN 978-5-0050-2136-6.

УДК 620.98

Щербаков А. В.
Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, Рязань, Россия

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЗАМЕНЫ МАСЛЯНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ НА ЭЛЕГАЗОВЫЕ НА ОРУ-220 КВ РЯЗАНСКОЙ ГРЭС

Аннотация. В статье рассматривается комплексное технико-экономическое обоснование проекта модернизации открытого распределительного устройства напряжением 220 кВ Рязанской ГРЭС путем замены устаревших масляных выключателей на современное элегазовое оборудование. Анализируется текущее техническое состояние коммутационной аппаратуры, отработавшей нормативный срок службы, выявляются факторы, снижающие надежность работы станции как ключевого звена энергосистемы Центральной России. Представлена сравнительная характеристика эксплуатационных параметров масляных и элегазовых выключателей, проведена оценка экономической эффективности с учетом капитальных затрат, эксплуатационных расходов и предотвращенного ущерба от аварийных отключений. Обоснована необходимость технического перевооружения ОРУ–220 кВ в контексте реализуемой на Рязанской ГРЭС программы повышения надежности генерирующего оборудования до 2027 года, разработанной Системным оператором ЕЭС и АО «Техническая инспекция ЕЭС». Предложенное решение позволит снизить технологические потери электроэнергии, сократить эксплуатационные издержки на обслуживание и ремонт, повысить пожарную безопасность и улучшить режимно-балансовую ситуацию в южной части Объединенной энергосистемы Центра.

Ключевые слова: элегазовые выключатели, масляные выключатели, открытое распределительное устройство, техническое перевооружение, экономическая эффективность, Рязанская ГРЭС, надежность электроснабжения.

Техническое состояние действующего оборудования ОРУ–220 кВ и обоснование необходимости его замены

Рязанская ГРЭС входит в пятерку крупнейших тепловых электростанций России с установленной мощностью 3070 МВт и является ключевым поставщиком электроэнергии на балансирующем рынке Центрального региона. Открытое распределительное устройство напряжением 220 кВ выполняет функцию основного узла выдачи мощности в энергосистему и обеспечивает связь с региональными потребителями через семь отходящих воздушных линий электропередачи. Надежность работы ОРУ–220 кВ напрямую влияет на режимно-балансовую ситуацию в южной части Объединенной энергосистемы Центра, что особенно критично в

периоды максимальных нагрузок и экстремально высоких температур окружающего воздуха [1].

В настоящее время на ОРУ–220 кВ Рязанской ГРЭС эксплуатируются масляные выключатели, введенные в работу в 1970–1980-х годах. Паспортный срок службы этого оборудования составляет 25 лет, однако фактический срок эксплуатации для большинства аппаратов превышает 40 лет. Результаты технического обследования, проведенного специалистами АО «Техническая инспекция ЕЭС» в рамках выполнения поручения Федерального штаба по безопасности электроснабжения, выявили существенный физический и моральный износ коммутационной аппаратуры [2]. Зафиксированы случаи отказов пружинных механизмов управления выключателями, увеличения времени срабатывания контактных групп, снижения качества изоляции трансформаторного масла вследствие длительной эксплуатации без должного контроля параметров.

Масляные выключатели характеризуются рядом эксплуатационных недостатков. Использование трансформаторного масла как дугогасящей среды создает повышенную пожарную опасность, особенно при возникновении коммутационных перенапряжений или коротких замыканий. Масло требует регулярного контроля физико-химических параметров и периодической замены, что увеличивает эксплуатационные расходы и трудозатраты обслуживающего персонала. При коммутациях в масляной среде образуются газы разложения, содержащие углерод, что приводит к загрязнению контактов и снижению надежности последующих операций.

Габаритные размеры масляных выключателей значительно превышают размеры современных элегазовых аналогов, а межремонтный период не превышает 2–3 лет. Это требует частых остановов оборудования для проведения плановых ремонтов и технических обслуживаний, что снижает оперативную готовность станции и ограничивает маневренность при управлении режимом энергосистемы. В условиях растущих требований к динамической устойчивости энергосистем и обеспечению балансирующей мощности устаревшее коммутационное оборудование становится фактором, ограничивающим технические возможности станции [3].

Впрочем, здесь картина неоднородная. Часть масляных выключателей, установленных на менее нагруженных присоединениях, формально сохраняет работоспособность по результатам эксплуатационных испытаний, однако отсутствие единой стратегии реновации приводит к ситуации, когда в пределах одного ОРУ функционирует разнородное оборудование различного поколения и производителей. Такая конфигурация усложняет управление схемой, требует поддержания на складе широкой номенклатуры запасных частей и создает дополнительные риски при координации действий персонала в аварийных ситуациях.

В декабре 2025 года Системный оператор ЕЭС, АО «Техническая инспекция ЕЭС» и ПАО «ОГК-2» разработали план мероприятий, направленных на повышение надежности работы генерирующего оборудования и минимизацию технических ограничений установленной мощности Рязанской ГРЭС [2]. План предусматривает поэтапную реализацию до конца 2027 года специальных мероприятий на основном и вспомогательном оборудовании, включая модернизацию электротехнической части. Замена масляных выключателей на элегазовые в составе ОРУ–220 кВ входит в комплекс этих мероприятий как приоритетная задача, обеспечивающая снятие части технических ограничений установленной электрической мощности станции еще до начала летнего периода 2026 года – периода экстремально высоких температур окружающего воздуха.

Сравнительный анализ технических характеристик масляных и элегазовых выключателей

Элегазовые выключатели используют гексафторид серы (SF_6) в качестве изоляционной и дугогасящей среды. При давлении 0,3–0,4 МПа электрическая прочность элегаза превышает прочность трансформаторного масла, что позволяет значительно сократить габаритные размеры оборудования без снижения эксплуатационных параметров [4]. Элегаз химически инертен, негорюч и не образует коррозионно-активных продуктов разложения при кратковременном воздействии электрической дуги, что принципиально отличает его от масляной среды, подверженной окислению и термическому разложению.

Коммутационный ресурс элегазовых выключателей достигает 10 000 циклов включения-отключения, тогда как для масляных выключателей этот параметр составляет не более 1500–2000 операций. Межремонтный период для элегазового оборудования увеличивается до 8–10 лет, что сокращает эксплуатационные издержки на плановые ремонты и позволяет персоналу станции перераспределить трудовые ресурсы на решение других задач. Время гашения дуги в элегазовом выключателе составляет 2–3 полупериода промышленной частоты, что в 1,5–2 раза ниже, чем в масляных аналогах, и обеспечивает более высокое быстродействие релейной защиты и противоаварийной автоматики [5].

Масляные выключатели требуют регулярного контроля качества трансформаторного масла, включая определение пробивного напряжения, кислотного числа, содержания водорастворимых кислот и механических примесей. Периодичность таких испытаний составляет 1–2 года, а при обнаружении отклонений от нормы необходима замена или регенерация масла, что сопровождается выводом оборудования из эксплуатации на несколько суток. В элегазовых выключателях контроль состояния рабочей среды сводится к автоматическому мониторингу давления и плотности газа с

помощью встроенных датчиков, передающих данные в систему диспетчерского управления в режиме реального времени без необходимости вывода аппарата из работы.

Площадь, занимаемая элегазовым выключателем на 220 кВ, составляет 10–15% от площади, требуемой для размещения масляного аппарата аналогичного класса напряжения. Эта особенность становится критичной при реконструкции действующих подстанций в условиях ограниченных территориальных ресурсов, характерных для электростанций, расположенных в застроенных промышленных зонах. Компактность современного оборудования позволяет проводить замену выключателей без значительной переработки существующих фундаментов и конструкций порталов, что сокращает объем строительно-монтажных работ и снижает капитальные затраты на реконструкцию [6].

Экологическая безопасность элегазовых выключателей обеспечивается отсутствием жидких диэлектриков и минимизацией риска загрязнения почвы и грунтовых вод в случае разгерметизации оборудования. При этом элегаз относится к газам с высоким потенциалом глобального потепления, что требует соблюдения регламента утилизации отработавшего оборудования и контроля утечек в процессе эксплуатации. На практике, однако, современные элегазовые выключатели оснащены системами автоматического контроля герметичности и сигнализации утечек, что минимизирует выбросы SF_6 в атмосферу и соответствует требованиям экологического законодательства Российской Федерации.

Важным преимуществом элегазовых выключателей является возможность интеграции в цифровую систему управления подстанцией на базе стандарта МЭК 61850. Микропроцессорные терминалы релейной защиты и автоматики, встроенные в современное коммутационное оборудование, обеспечивают передачу диагностической информации, осциллограмм аварийных процессов и данных о расходе коммутационного ресурса в единую диспетчерскую систему контроля и управления. Такая интеграция создает базу для реализации системы централизованной защиты, прогнозирования остаточного ресурса оборудования и планирования ремонтов на основе фактического технического состояния, а не нормативных сроков [7].

Методика расчета экономической эффективности проекта модернизации

Оценка экономической целесообразности замены масляных выключателей на элегазовые основывается на анализе приведенных затрат с учетом капитальных вложений, эксплуатационных расходов, стоимости потерь электроэнергии и предотвращенного ущерба от аварийных отключений на расчетном периоде жизненного цикла оборудования. Расчетный период принимается равным 25 годам – нормативному сроку службы элегазовых

выключателей класса напряжения 220 кВ согласно техническим условиям производителей и требованиям ГОСТ Р 52565-2006.

Капитальные затраты включают стоимость закупки оборудования, транспортировку, строительно-монтажные работы, пусконаладку и ввод в эксплуатацию. Средняя стоимость элегазового выключателя 220 кВ производства российских заводов (ЗАО «Электроаппарат», Санкт-Петербург; АО «Уралэлектротяжмаш», Екатеринбург) составляет 4,5–6,0 млн рублей за единицу, в зависимости от типа привода и уровня автоматизации. Для полной замены оборудования на ОРУ–220 кВ Рязанской ГРЭС, включающего 18 присоединений, требуется закупка 18 элегазовых выключателей, что дает суммарные затраты на оборудование в размере 81–108 млн рублей. Строительно-монтажные работы, включающие демонтаж устаревших аппаратов, подготовку фундаментов, монтаж нового оборудования и пусконаладку, оцениваются в 25–30% от стоимости оборудования, то есть 20–32 млн рублей [8].

Эксплуатационные расходы на обслуживание масляных выключателей включают затраты на персонал, выполняющий регламентные работы, закупку и регенерацию трансформаторного масла, ремонт механизмов управления и контактных групп, а также затраты на вывод оборудования из работы для проведения плановых ремонтов. По данным Башмакова Д.А. и соавторов, обследовавших аналогичное оборудование ОРУ–110 кВ Набережночелнинской ТЭЦ, годовые эксплуатационные расходы на один масляный выключатель составляют 180–220 тыс. рублей, тогда как для элегазового аппарата эта величина снижается до 45–60 тыс. рублей в год [1]. Для 18 выключателей ОРУ–220 кВ Рязанской ГРЭС разница в эксплуатационных расходах составит 2,16–2,88 млн рублей ежегодно, что за 25 лет эксплуатации даст накопленную экономию 54–72 млн рублей в текущих ценах без учета дисконтирования.

Потери электроэнергии в масляных выключателях обусловлены как активными потерями в контактных соединениях, так и потерями холостого хода в приводных механизмах. Элегазовые выключатели имеют более совершенную конструкцию контактной системы, что снижает переходное сопротивление и, соответственно, потери активной мощности. Снижение потерь оценивается в 15–20 кВт на один выключатель при номинальной нагрузке, что для 18 присоединений дает суммарное снижение потерь на 270–360 кВт. При среднегодовом коэффициенте использования установленной мощности 0,65 и стоимости электроэнергии на балансирующем рынке 3,5 руб./кВт·ч экономия от снижения потерь составит 5,4–7,2 млн рублей в год, а за расчетный период – 135–180 млн рублей.

Наибольший экономический эффект дает предотвращение аварийных отключений вследствие отказов устаревшего оборудования. Статистика

аварийности масляных выключателей, отработавших более 40 лет, показывает увеличение интенсивности отказов до 0,08–0,12 отказов на единицу оборудования в год, тогда как для новых элегазовых аппаратов этот показатель не превышает 0,005–0,008 [3]. Каждое аварийное отключение генерирующего блока Рязанской ГРЭС сопровождается недоотпуском электроэнергии, компенсационными выплатами потребителям и затратами на восстановление оборудования. По оценкам специалистов Системного оператора ЕЭС, средний ущерб от одного внепланового останова энергоблока мощностью 800 МВт составляет 18–25 млн рублей. При замене масляных выключателей на элегазовые количество аварийных отключений сокращается в 10–15 раз, что дает предотвращенный ущерб порядка 12–18 млн рублей ежегодно, или 300–450 млн рублей за расчетный период.

Дисконтирование денежных потоков производится по ставке 10% годовых, соответствующей средневзвешенной стоимости капитала для проектов технического перевооружения объектов электроэнергетики согласно методическим указаниям Минэнерго России. Чистый дисконтированный доход за 25 лет эксплуатации, рассчитанный с учетом капитальных затрат 101–140 млн рублей и суммарного экономического эффекта 489–702 млн рублей, составляет 210–340 млн рублей. Срок окупаемости проекта оценивается в 4,5–6,0 лет, что соответствует требованиям инвестиционной привлекательности для проектов обновления основных фондов генерирующих компаний [9].

Следует, впрочем, сделать оговорку: приведенные расчеты основаны на предположении о стабильности цен на оборудование и тарифов на электроэнергию на протяжении расчетного периода. В условиях волатильности курса рубля и изменений конъюнктуры рынка электротехнической продукции фактические капитальные затраты могут отклоняться от прогнозных значений на 15–20%. Это, однако, не меняет общего вывода о высокой экономической эффективности замены устаревшего оборудования, поскольку основной вклад в чистый дисконтированный доход вносит предотвращение аварийных отключений и снижение эксплуатационных расходов – параметры, в меньшей степени зависящие от колебаний внешнеэкономических факторов.

Организация реализации проекта и оценка рисков

Реализация проекта замены масляных выключателей на элегазовые на ОРУ–220 кВ Рязанской ГРЭС осуществляется в рамках утвержденного плана мероприятий по повышению надежности работы генерирующего оборудования и минимизации технических ограничений установленной мощности станции, разработанного совместно Системным оператором ЕЭС, АО «Техническая инспекция ЕЭС» и ПАО «ОГК-2». Проект предусматривает поэтапную замену оборудования с разделением работ на три этапа:

подготовительный (до июня 2026 года), основной (до декабря 2026 года) и завершающий (до декабря 2027 года) [2].

На подготовительном этапе выполняются проектно-изыскательские работы, включающие детальное обследование технического состояния действующего оборудования, разработку технического задания на поставку элегазовых выключателей, согласование схемных решений с Системным оператором и получение разрешений на проведение работ. Проводится конкурсный отбор поставщика оборудования с учетом требований к локализации производства, наличию сервисных центров на территории Центрального федерального округа и возможности поставки запасных частей в течение всего жизненного цикла аппаратуры. Опыт реализации аналогичных проектов на Новосибирской ТЭЦ-3, Чебоксарской ГЭС и Читинской ТЭЦ-1 показывает целесообразность выбора российских производителей, обеспечивающих более короткие сроки поставки и техническую поддержку на этапе эксплуатации [10].

Основной этап предполагает демонтаж устаревших масляных выключателей, подготовку оснований и фундаментов под новое оборудование, монтаж элегазовых аппаратов, прокладку кабельных трасс для подключения систем управления и релейной защиты, а также интеграцию нового оборудования в существующую диспетчерскую систему контроля и управления. Работы выполняются специализированной подрядной организацией с опытом реализации проектов технического перевооружения высоковольтного оборудования электростанций. Для минимизации влияния на режим работы энергосистемы замена оборудования производится в периоды плановых ремонтов энергоблоков и в периоды минимальных нагрузок – поздней осенью и ранней весной, когда потребление электроэнергии в регионе снижается.

Завершающий этап включает пусконаладочные работы, проверку функционирования релейной защиты и противоаварийной автоматики, комплексное опробование нового оборудования под нагрузкой и оформление актов ввода в эксплуатацию. Особое внимание уделяется проверке координации действий устройств защиты в различных режимах работы сети, включая режимы коротких замыканий, несимметричных повреждений и качаний в энергосистеме. Согласно требованиям приказа Минэнерго России от 12.08.2022 № 811, все испытания и проверки документируются в протоколах, которые становятся основой для актуализации оперативной документации и инструкций по обслуживанию оборудования [5].

Риски реализации проекта связаны с возможными задержками поставки оборудования, увеличением стоимости строительно-монтажных работ вследствие изменения конъюнктуры рынка подрядных услуг, а также с техническими сложностями при интеграции нового оборудования в

существующую инфраструктуру станции. Для минимизации этих рисков предусматривается резервирование сроков поставки, заключение договоров с твердой ценой на выполнение работ и привлечение специалистов заводов-изготовителей на этапе пусконаладки. Кроме того, предварительное моделирование режимов работы модернизированного ОРУ–220 кВ с использованием программных комплексов расчета переходных процессов позволяет выявить потенциальные проблемы на стадии проектирования и внести необходимые коррективы в схемные решения до начала монтажных работ.

Практика реализации проектов технического перевооружения на российских электростанциях в 2023–2025 годах демонстрирует высокую востребованность элегазового оборудования российского производства. СГК в рамках инвестиционной программы 2025 года выполнила замену высоковольтных выключателей на четырех ТЭЦ Новосибирска и Барабинской ТЭЦ в Куйбышеве с общим объемом вложений более 220 млн рублей, что подтверждает техническую и организационную реализуемость аналогичных проектов на других объектах генерации [11]. Опыт Чебоксарской ГЭС, где все устаревшие масляные выключатели ОРУ–220 кВ были заменены на элегазовое оборудование производства швейцарского концерна ABB, показал возможность выполнения работ без существенных нарушений графика выдачи мощности станции в энергосистему.

Заключение

Проведенный анализ технико-экономической целесообразности замены масляных выключателей на элегазовые на ОРУ–220 кВ Рязанской ГРЭС подтверждает высокую эффективность предлагаемого решения как с точки зрения повышения надежности работы станции, так и с позиций экономической эффективности на расчетном периоде жизненного цикла оборудования. Устаревшие масляные выключатели, отработавшие более 40 лет, характеризуются повышенной аварийностью, высокими эксплуатационными расходами на обслуживание и ремонт, а также пожарной опасностью, что создает риски для непрерывности электроснабжения потребителей Центрального региона.

Замена масляных выключателей на современное элегазовое оборудование обеспечит снижение интенсивности отказов коммутационной аппаратуры в 10–15 раз, сокращение эксплуатационных расходов на 2,16–2,88 млн рублей ежегодно, снижение технологических потерь электроэнергии на 270–360 кВт и предотвращение аварийных отключений с ущербом 12–18 млн рублей в год. Чистый дисконтированный доход за 25 лет эксплуатации составляет 210–340 млн рублей при капитальных затратах 101–140 млн рублей и сроке окупаемости 4,5–6,0 лет, что соответствует критериям экономической эффективности инвестиционных проектов энергетических компаний.

Реализация проекта вписывается в утвержденный план мероприятий по повышению надежности работы Рязанской ГРЭС до конца 2027 года, разработанный Системным оператором ЕЭС и АО «Техническая инспекция ЕЭС». Поэтапное выполнение работ с выводом оборудования из работы в периоды плановых ремонтов и минимальных нагрузок позволит провести модернизацию без существенного влияния на режимно-балансовую ситуацию в энергосистеме. Опыт реализации аналогичных проектов на других российских электростанциях в 2023–2025 годах подтверждает техническую и организационную реализуемость предложенного решения.

Дополнительным эффектом от замены масляных выключателей на элегазовые станет возможность интеграции нового оборудования в цифровую систему управления подстанцией на базе стандарта МЭК 61850, что создаст основу для реализации систем централизованной защиты, диагностического мониторинга технического состояния и планирования ремонтов на основе фактического расхода ресурса оборудования. Это позволит повысить эффективность управления активами электростанции, сократить затраты на избыточные регламентные работы и улучшить оперативную готовность станции к участию в регулировании режима энергосистемы.

Направлениями дальнейших исследований могут стать разработка методики оценки остаточного ресурса элегазовых выключателей с учетом реальных условий эксплуатации на ОРУ электростанций, анализ влияния применения элегазового оборудования на показатели надежности схем электрических соединений различной конфигурации, а также изучение возможностей применения альтернативных дугогасящих сред с низким потенциалом глобального потепления в высоковольтных коммутационных аппаратах для объектов генерации.

Список литературы:

1. Сайфутдинова А. И., Сайфутдинов З. Г., Башмаков Д. А. Повышение надежности ОРУ-110 кВ НЧ ТЭЦ путем замены маломасляных выключателей на элегазовые // XIV Камские чтения : сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Набережные Челны : Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, 2022. – С. 327–330. EDN: SQMQSR

2. Мероприятия по повышению надежности работы Рязанской ГРЭС позволят значительно улучшить ситуацию в южной части ОЭС Центра [Электронный ресурс] // Официальный сайт АО «Системный оператор Единой энергетической системы». – URL: https://www.ruscable.ru/news/2025/12/19/Meropriyatiya_po_povysheniu_nadezhnosti_raboty_Rya/ (дата обращения: 18.04.2026).

3. Громова А. В., Танцюра А. О. Анализ технических решений по модернизации подстанции 110/10 кВ при переходе на новое электрооборудование // Вестник науки. – 2026. – № 2 (95). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-tehnicheskih-resheniy-po-

modernizatsii-podstantsii-110-10-kv-pri-perehode-na-novoe-elektrooborudovanie (дата обращения: 18.04.2026).

4. Лопатин В. П., Ишмухамедов И. К. Современное элегазовое электрооборудование подстанций систем электроснабжения и особенности его эксплуатации // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2015. – № 1. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-elegazovoe-elektrooborudovanie-podstantsiy-sistem-elektrosnabzheniya-i-osobennosti-ego-ekspluatatsii (дата обращения: 18.04.2026).

5. Гондуров С. А., Евсеев А. Н., Генин В. С., Марков В. Н., Нестеров А. П., Кознов В. В. Модернизация релейной защиты и автоматики подстанций НГДП ОАО «Татнефть» // Экспозиция Нефть Газ. – 2015. – № 1 (40). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modernizatsiya-releynoy-zaschity-i-avtomatiki-podstantsiy-ngdp-oao-tatneft (дата обращения: 18.04.2026).

6. Зацаринная Ю. Н., Нурмеев Т. А. Преимущества эксплуатации комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 22. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestva-ekspluatatsii-komplektnyh-raspredelitelnyh-ustroystv-s-elegazovoy-izolyatsiey (дата обращения: 18.04.2026).

7. Афанасьев А. Г. К вопросу реконструкции трансформаторной подстанции // Наука и современность. – 2013. – № 25-2. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-rekonstruktsii-transformatornoy-podstantsii (дата обращения: 18.04.2026).

8. Винокуров Е. В., Сорокин Н. С., Виноградов А. В., Тендетник Р. А. Обоснование необходимости разработки стратегий по замене силовых трансформаторов 6–10/0,4 кВ в электросетевых компаниях // Агротехника и энергообеспечение. – 2025. – № 3 (48). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-neobhodimosti-razrabotki-strategiy-po-zamene-silovyh-transformatorov-6-10-0-4-kv-v-elektrosetevyh-kompaniyah (дата обращения: 18.04.2026).

9. Хатанова И. А., Елизарова А. А. Технико-экономическое обоснование замены трансформаторов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2007. – № 11–12. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tehniko-ekonomicheskoe-obosnovanie-zameny-transformatorov (дата обращения: 07.06.2026).

10. На Читинской ТЭЦ-1 заменили выключатель 220 кВ [Электронный ресурс] // Энергострана. – URL: http://www.energyland.info/news-show-tek-electro-245899 (дата обращения: 18.04.2026).

11. СГК заменит высоковольтные выключатели на четырех ТЭЦ [Электронный ресурс] // Энергострана. – URL: https://energyland.info/news-show-tek-electro-277024 (дата обращения: 18.04.2026).

12. Корнилов Г. П., Абдулвелеев И. Р., Коваленко А. Ю. Повышение надежности электроснабжения металлургических агрегатов за счет схемотехнических решений // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 59–69. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-nadezhnosti-elektrosnabzheniya-metallurgicheskih-agregatov-za-schet-shemotehnicheskih-resheniy (дата обращения: 18.04.2026).

УДК 004.42:37.04

Федорова Д. А., Шарапов А. А.
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

ФРОНТЕНД-РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ПОРТФОЛИО ОБУЧАЮЩЕГОСЯ

Аннотация. В статье представлены основные результаты разработки клиентской части автоматизированной системы «Портфель» для организации конкурсов и формирования цифрового портфолио в учреждениях дополнительного образования. Проведен анализ предметной области, выявивший отсутствие интегрированных решений для сквозного сопровождения конкурсной деятельности. Обоснован выбор технологического стека фронтенда: React, TypeScript, Tailwind CSS, Framer Motion, Axios. Описана реализация ролевой модели интерфейса для четырёх типов пользователей (ученик, учитель, модератор, администратор), модулей подачи заявок, личного кабинета, публичной выставки и портфолио. Представлены результаты функционального и юзабилити-тестирования, подтвердившие корректность работы и удобство интерфейса. Разработанный фронтенд готов к интеграции с серверной частью и внедрению в образовательный процесс.

Ключевые слова: цифровое портфолио, фронтенд, React, TypeScript, ролевая модель, дополнительное образование.

Введение

Цифровая трансформация образования предъявляет новые требования к учёту и демонстрации достижений обучающихся. Традиционные бумажные портфолио, а также разрозненные электронные таблицы и облачные хранилища не обеспечивают ни оперативного доступа к данным, ни единой картины участия ребёнка в конкурсной деятельности [1, 2]. Особенно остро эта проблема стоит в сфере дополнительного образования, где количество конкурсных мероприятий максимально, а процессы сбора заявок, публикации результатов и формирования портфолио зачастую не автоматизированы [3].

Существующие решения, такие как Google Forms, «Навигатор дополнительного образования» или специализированные порталы типа «Парад талантов России», решают лишь отдельные задачи: сбор заявок, каталогизацию программ или проведение открытых конкурсов. Однако ни одна из платформ не предоставляет образовательной организации инструмента для сквозного ведения конкурсного процесса [3] с одновременным формированием цифрового портфолио каждого учащегося и реализацией ролевой модели (ученик – учитель – модератор – администратор).

Настоящая работа посвящена разработке клиентской части системы «Портфель», призванной устранить этот функциональный разрыв. Целью исследования является создание интуитивно понятного, адаптивного и

производительного веб-интерфейса, обеспечивающего все этапы конкурсного сопровождения: от регистрации и подачи заявки до публикации результатов и пополнения портфолио.

Анализ предметной области и требования к интерфейсу

Анализ деятельности центров дополнительного образования позволил выделить ключевые проблемы, существующие в настоящее время. К ним относятся децентрализация данных о достижениях учащихся, дублирование ручного ввода информации на разных этапах, отсутствие прозрачности конкурсных процедур для родителей и учеников, а также высокие трудозатраты педагогов на оформление отчётности и наградных документов. Для решения этих проблем интерфейс будущей системы должен удовлетворять нескольким ключевым требованиям. Во-первых, необходима ролевая дифференциация, то есть различные наборы функций и экранов для ученика, учителя, модератора и администратора. Во-вторых, система должна обеспечивать сквозные процессы, формируя единый контур «подача заявки – участие – получение диплома – портфолио». В-третьих, интерфейс обязан быть адаптивным, корректно отображаясь на настольных компьютерах, планшетах и смартфонах. Кроме того, требуется наглядность, достигаемая визуализацией конкурсных работ на выставке, удобной навигацией и поиском, а также полноценная интеграция с сервером посредством обмена данными по REST API с использованием JWT-токенов.

Методы и технологии

При выборе технологического стека фронтенда учитывались современные требования к производительности, типизации и скорости разработки. Основой выбран React версии 18 – библиотека, позволяющая строить переиспользуемые компоненты и эффективно управлять состоянием интерфейса. В сочетании с TypeScript достигается статическая типизация, снижающая количество потенциальных ошибок на этапе разработки и упрощающая сопровождение кода. Для управления маршрутизацией применён React Router DOM версии 6, реализующий декларативное объявление маршрутов с защитой доступа в зависимости от роли пользователя. HTTP-запросы к серверу централизованы через Axios, который предоставляет удобный интерфейс для перехватчиков, позволяющих автоматически подставлять JWT-токен в заголовок Authorization [4-7].

Стилизация выполнена с помощью Tailwind CSS – утилитарного CSS-фреймворка, обеспечивающего высокую скорость вёрстки и минимальный размер итогового бандла за счёт удаления неиспользуемых стилей. Анимации переходов и появления элементов реализованы на библиотеке Framer Motion, создающей плавные визуальные эффекты без потери производительности [8]. Для уведомлений пользователя о результатах действий, таких как успешная подача заявки или ошибка авторизации, используется react-hot-toast [9]. Выбор

данного стека обоснован его популярностью в индустрии, активной поддержкой сообщества и проверенной способностью создавать масштабируемые веб-приложения [10].

Проектирование архитектуры фронтенда

Архитектура клиентского приложения строится на принципе компонентного подхода [11]. Вся логика разделена на следующие слои: слой представления, содержащий компоненты страниц, соответствующие маршрутам; компонентный слой, включающий переиспользуемые UI-блоки, такие как карточки конкурсов, модальные окна, формы и таблицы; слой сервисов, в котором расположены модули для взаимодействия с API, например authService, competitionService и applicationService; а также слой утилит со вспомогательными функциями для форматирования дат, валидации и хранения токена [12-14].

Маршрутизация построена с учётом ролей пользователей. Неавторизованный пользователь имеет доступ только к главной странице с вкладками «Конкурсы», «Результаты» и «Выставка». После входа в систему маршрутизатор проверяет роль из декодированного JWT и перенаправляет пользователя в соответствующий личный кабинет. На всех защищённых маршрутах установлен компонент PrivateRoute, который проверяет наличие валидного токена в localStorage (срок действия токена составляет семь дней). При отсутствии токена или его истечении выполняется перенаправление на страницу входа [15, 16]. Управление состоянием на страницах осуществляется с помощью встроенных хуков React, таких как useState, useEffect и useCallback. Для сложных форм с множеством полей применяется кастомный хук useForm, централизующий логику валидации и отправки данных [17].

Практическая реализация

В ходе работы были реализованы все ключевые модули системы в соответствии с ролевой моделью. Модуль аутентификации и регистрации включает страницу входа с формой, содержащей поля «логин» и «пароль». После успешной отправки запроса к эндпоинту /api/auth/login сервер возвращает JWT, который сохраняется в localStorage. Для защиты от подбора паролей интегрировано ограничение: при пяти неудачных попытках входа с одного IP-адреса клиент получает соответствующую ошибку и блокирует дальнейшие отправки на пятнадцать минут [18]. Страница регистрации для новых пользователей отправляет заявку на эндпоинт /api/register/apply.

Личный кабинет ученика содержит две основные вкладки. Вкладка «Участие в конкурсах» отображает список заявок с кнопкой «Моя заявка» для просмотра деталей; если конкурс активен, но заявка ещё не подана, отображается кнопка «Подать заявку». Вкладка «Портфолио» представляет собой список полученных дипломов с возможностью скачать отдельный

диплом или все дипломы одним ZIP-архивом посредством запроса к эндпоинту /api/results/my/zip.

Личный кабинет учителя отображает список его учеников в виде кликабельных карточек. При нажатии на карточку открывается профиль ученика с его заявками и дипломами. Реализована форма создания профиля ученика без привязки к аккаунту – данные сохраняются в таблицу profiles. При подаче заявки за ученика учитель выбирает его из выпадающего списка, после чего форма автоматически заполняется данными выбранного ученика, а поля руководителя (фамилия, имя, отчество, телефон, электронная почта) заполняются данными самого учителя, причём учитель может редактировать эти поля перед отправкой.

Личный кабинет модератора включает несколько вкладок. Вкладка «Конкурсы» позволяет создавать, редактировать, мягко удалять и завершать конкурсы. Вкладка «Результаты» отображает завершённые конкурсы с возможностью скомпилировать данные для жюри в Excel-файл и опубликовать результаты с загрузкой PDF-дипломов. Вкладка «Выставка» содержит список заявок, авторы которых согласились на участие в выставке, с кнопками одобрения и отклонения. Также присутствует вкладка «Степени и Тематики» для управления справочниками.

Личный кабинет администратора содержит вкладку «Заявки на регистрацию» для одобрения или отклонения заявок, а также генерации логина и пароля, и вкладку «Пользователи» с функционалом поиска и мягкого удаления, причём кнопка удаления скрыта для администратора и модератора, чтобы предотвратить их случайное удаление.

Форма подачи заявки реализована как универсальный компонент, поведение которого зависит от роли текущего пользователя. Для ученика поля фамилии, имени, отчества, организации и города подтягиваются из профиля и доступны для редактирования. Для учителя при выборе ученика его данные подтягиваются автоматически. Валидация на стороне клиента проверяет заполнение обязательных полей, корректность электронной почты и формата ссылки, если выбран тип вложения «ссылка». Прикрепляемое изображение перед отправкой валидируется по размеру (не более десяти мегабайт) и типу файла (JPEG или PNG).

Публичная выставка представляет собой сетку карточек работ, одобренных модератором. Реализована фильтрация по тематике конкурса. При клике на карточку открывается модальное окно с детальным описанием работы и увеличенным изображением.

Модуль экспорта и генерации отчётов инициирует на фронтенде запрос к эндпоинту /api/export/competition/:competitionId. Сервер формирует Excel-файл, в который встроены миниатюры конкурсных работ. Полученный файл сохраняется на компьютере пользователя через механизм Blob и ссылку для

скачивания. Аналогичным образом происходит скачивание ZIP-архива с дипломами.

Тестирование

Функциональное тестирование проведено по двадцати ключевым сценариям [19], охватывающим регистрацию, вход в систему, создание конкурсов, подачу заявок (как учеником, так и учителем), публикацию результатов, скачивание дипломов, управление пользователями и работу выставки. Все сценарии завершились успешно, ошибок интерфейса не выявлено. Нагрузочное тестирование выполнено с помощью инструмента k6: виртуальные пользователи одновременно осуществляли операции входа в систему, просмотра каталога конкурсов, загрузки страницы портфолио и скачивания архива дипломов. Измеренные показатели сведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результат нагрузочного тестирования

Показатель	**Значение**
Общее число запросов	12 450
Максимальное количество одновременных пользователей	100
Среднее время ответа	187 мс
Медианное время ответа	152 мс
95-й процентиль времени ответа	342 мс
Количество ошибок	0
Процент успешных запросов	100 %

Как показали нагрузочные испытания, при ста одновременных виртуальных пользователях система продемонстрировала стабильную работу: среднее время ответа составило 187 миллисекунд, медиана – 152 миллисекунды, а 95-й процентиль не превысил 342 миллисекунды. Все запросы были обработаны успешно, количество ошибок равно нулю [12].

Юзабилити-тестирование с участием пяти респондентов, включая педагогов и учащихся, дало среднюю оценку удобства интерфейса 4,2 из пяти. Основные замечания касались расположения кнопки выхода из системы и необходимости подтверждения действия перед удалением – эти замечания были учтены при доработке. Интеграционное тестирование взаимодействия с сервером подтвердило корректную обработку всех HTTP-статусов: 200 (успех), 201 (создано), 400 (ошибка валидации), 401 (неавторизован) и 403 (доступ запрещён). При получении статуса 401 перехватчик Axios автоматически очищает localStorage и перенаправляет пользователя на страницу входа. Тестирование производительности в инструментах

разработчика Chrome (Lighthouse) [20] показало для главной страницы следующие результаты: производительность – 92 балла, доступность – 98, лучшие практики – 100, SEO – 100. Медленные операции, такие как генерация ZIP-архива, не блокируют интерфейс благодаря асинхронной отправке запроса и отображению индикатора загрузки.

Заключение

В ходе выполнения работы разработан клиентский компонент автоматизированной системы «Портфель», обеспечивающей полный цикл проведения конкурсов в учреждениях дополнительного образования. Реализована ролевая модель интерфейса для четырёх типов пользователей – ученика, учителя, модератора и администратора, – а также модули подачи заявок, ведения портфолио, публичной выставки и административного управления. Технологический стек, включающий React, TypeScript и Tailwind CSS, показал высокую эффективность и удобство разработки. Нагрузочное тестирование подтвердило способность системы выдерживать одновременную работу ста пользователей при среднем времени отклика 187 миллисекунд и нулевом количестве ошибок. Система прошла функциональное и юзабилити-тестирование, готова к интеграции с серверной частью и внедрению в реальный образовательный процесс. Дальнейшее развитие предполагает разработку мобильного приложения на базе React Native и добавление механизмов автоматической генерации дипломов на основе шаблонов.

Список литературы:

1. Архипенко, А. В. Автоматизированное электронное портфолио как метод оценки учебно-профессиональных достижений учащегося / А. В. Архипенко // Гуманизация образования. – 2024. – №2. – С. 40-54. DOI: 10.24412/2541-8734-2024-2-40-54 EDN: DQZCNQ
2. Пираков, Ф. Д. Разработка и применение системы повышения портфолио обучающегося в вузе / Ф. Д. Пираков, А. П. Клишин, Н. Л. Еремина, Е. Н. Клыжко // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2019. – № 4. – С. 87–100. DOI: 10.25205/1818-7900-2019-17-4-5-87-100 EDN: XSFALD
3. Курмангалиева, А. М. Разработка структуры информационной системы формирования портфолио обучающегося / А. М. Курмангалиева, М. М. Жаманкарин, М. К. Айткенова // Наука и реальность. – 2021. – № 2 (6). – С. 228–231. EDN: YHNBWK
4. Banks, A. Learning React: Functional Web Development with React and Redux / A. Banks, E. Porcello. – Sebastopol : O'Reilly Media, 2017. – 350 p. ISBN: 978-1-4919-5129-6
5. Rippon, C. Learn React with TypeScript: A Beginner's Guide to Reactive Web Development with React 18 and TypeScript / C. Rippon. – 2nd ed. – Birmingham : Packt Publishing, 2023. – 474 p. ISBN 978-1-804-61420-4
6. Chinnathambi, K. Learning React: A Hands-On Guide to Building Web Applications Using React and Redux / K. Chinnathambi. – London : Pearson Education, 2018. – 304 p.

7. Rozentals, N. Mastering TypeScript / N. Rozentals. – Birmingham : Packt Publishing, 2021. – 538 p.
8. Браун И. Веб-разработка с применением Node и Express. Полноценное использование стека JavaScript / И. Браун. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2021. ISBN 978-5-4461-0590-8
9. П. Дейтел, Х. Дейтел, Э. Дейтел, М. Моргано. Android для программистов: создаём приложения. – СПб.: Питер, 2013. – 560 с.: ил. ISBN 978-5-459-01646-8
10. Сан Феликс М. Н. Разработка веб-приложений с Quarkus и React : практическое руководство / пер. с англ. А. Н. Киселева. – Москва : ДМК Пресс, 2023. – 296 с. ISBN 978-5-93700-207-5
11. Фронтенд-разработка: ключевые технологии и понятия [Электронный ресурс] // OTUS : блог на Habr. – URL: https://habr.com/ru/companies/otus/articles/674748/ (дата обращения: 07.06.2026).
12. Гагарина Л. Г., Шевнина Ю. С. Разработка и эксплуатация автоматизированных информационных систем : учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : ИНФРА-М, 2025. – 358 с. – (Среднее профессиональное образование). DOI 10.12737/1985727. ISBN 978-5-16-018360-2
13. Коваленко В. В. Проектирование информационных систем : учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : ИНФРА-М, 2023. – 357 с. – (Высшее образование: Бакалавриат). DOI 10.12737/987869. ISBN 978-5-00091-783-1
14. Черемных С. В., Семенов И. О., Ручкин В. С. Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии : практикум. – Москва : Финансы и статистика, 2006. – 189 с. – (Прикладные информационные технологии). ISBN 5-279-02564-X
15. Калянов Г. Н. Моделирование, анализ, реорганизация и автоматизация бизнес-процессов : учебное пособие. – Москва : Финансы и статистика, 2006. – 238 с. – ISBN 5-279-03038-4
16. Вендров А. М. Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем : учебник. – Москва : Финансы и статистика, 2003. – 347 с. – ISBN 5-279-02144-X
17. Дейт, К. Дж. Введение в системы баз данных / К. Дж. Дейт. – Москва : Вильямс, 2005. – 1328 с. ISBN 978-5-8459-0788-4. EDN: QMORMN
18. Заботина Н. Н. Методы и средства проектирования информационных систем : учебное пособие. – Москва : ИНФРА-М, 2023. – 331 с. + Доп. материалы. – (Среднее профессиональное образование). ISBN 978-5-16-015597-5.
19. Елизаров Н. М., Зудилова Т. В. Разработка современных интерфейсов с использованием React // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2016. – Т. 2. – С. 85–87. EDN: ZOOSSF
20. Стандарты и мониторинг в образовании, 2025, № 3. – Текст : электронный // ЭБС Znanium. – URL: https://znanium.ru/catalog/product/2174167 (дата обращения: 07.06.2026).

УДК 621.332.3

Дровянников А. А., Фокина В. А.
Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЖЕСТКИХ ПОПЕРЕЧИН КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. В статье выполнен сравнительный анализ двух методов расчета жестких поперечин контактной сети: аналитического (по А.В. Фрайфельду) и по типовому проекту №5254. Показано, что при идентичности теоретической базы и близости методы различаются на уровне инженерного подхода. Сделан вывод о взаимодополняемости методов и целесообразности их комбинированного применения в зависимости от сложности проектной задачи.

Ключевые слова: контактная сеть, жесткая поперечина, изгибающий момент, аналитический метод расчета, типовой проект.

Контактная сеть железных дорог является неотъемлемой частью системы электроснабжения железнодорожного транспорта. Ее поддержка над осью пути на правильной высоте осуществляется опорами контактной сети и жесткими поперечинами. Однако выбор последних является сложным процессом, связанным с многими аспектами.

Жесткие поперечины являются ключевыми элементами контактной сети на станциях и многопутных перегонах, в связи с возможностью перекрыть одной конструкцией от 2 до 8 путей без увеличения габаритов между смежными путями для установки отдельных консольных опор контактной сети, принося экономическую выгоду. Дополнительными функциями для использования ригелей жестких поперечин можно назвать размещение на нем освещения для станций и стрелочных улиц, а также прокладка коммуникаций по ригелю без необходимости копки и бурения поперек путей.

Однако такая многозадачность приводит к более высоким требованиям по надежности данных конструкций, так как непосредственно связана с безопасностью движения поездов одновременно по нескольким железнодорожным путям. Поэтому вопрос выбора метода расчета конструкции несет важное практическое значение.

В сравнении будут приведены два метода расчета: аналитический метод, изложенный в учебном пособии А.В. Фрайфельда «Проектирование контактной сети» и нормативно-унифицированный метод, представленный в типовом проекте №5254 ОАО ЦНИИС «Унифицированные конструкции жестких поперечин балочного типа».

Для сравнения возьмем одинаковый случай армирования жесткой поперечины, представленный на Рисунке 1 в виде расчетной схемы с указанием мест приложения сил и длин плеч приложения этих сил. В данном

случае ригель перекрывает собой 5 путей: 2 главных, расположенных ближе всего к опорам, и 3 станционных, включенных между главными. В качестве рассчитываемого ригеля будет ОРЦ-320-4-34,01.

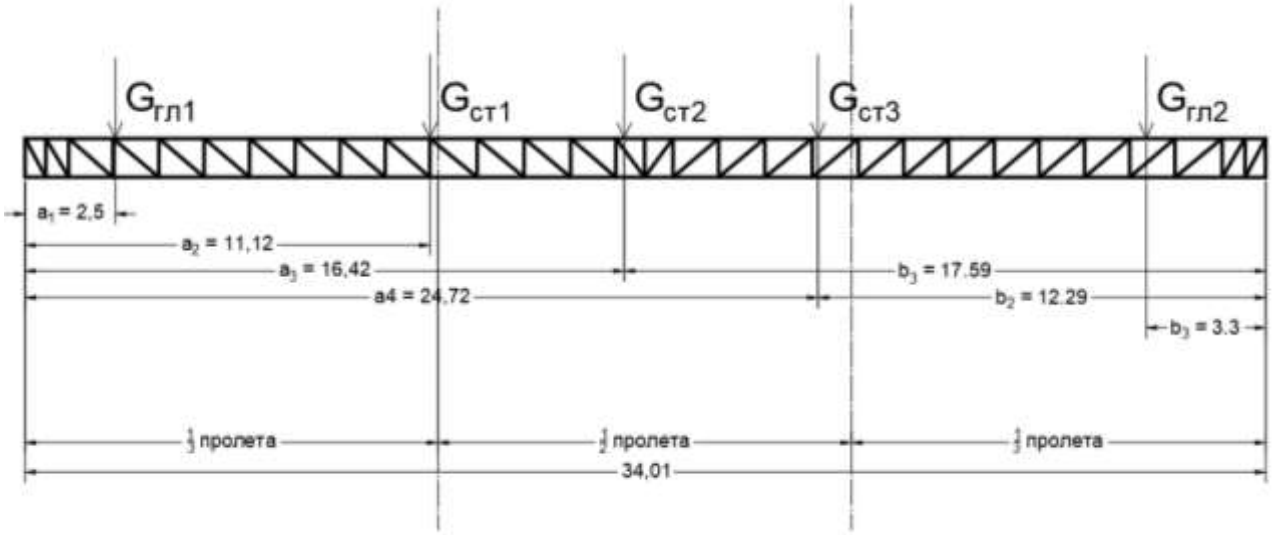


Рисунок 2 – Армирование расчетной жесткой поперечины

Аналитический метод расчета жесткой поперечины [1] начинается с определения изгибающего момента от всех подвесок, находящихся на ригеле по формуле:

$$M(G) = \alpha \sum_{i=1}^{n} G_i a_i + \beta \sum_{j=1}^{m} G_j a_j \qquad (1)$$

где α и β – коэффициенты, учитывающие положение расчетного сечения ригеля (для расположенного сечения по середине поперечины коэффициенты равны α = β = 0,5);

n и m – число нагрузок, расположенных слева и справа от расчетного сечения;

G_i и G_j – нагрузки от собственного веса подвесок, соответственно слева (i) и справа (j) от расчетного сечения, кгс;

a_i и a_j – плечи нагрузок от собственного веса, м.

Нагрузка от собственного веса подвески i (или j):

$$G_i = g_i l + G_т$$

где g_i – распределенная линейная нагрузка от веса 1 м подвески, кгс/м;

l – длина пролета подвески, м;

$G_т = 95$ кгс – нагрузка от веса конструкции в точке подвеса, кгс.

Для упрощения расчетной части определения изгибающего момента в середине жесткой поперечины примем допущения, что наибольшую нагрузку дает расчет при максимальном ветре 23,6 м/с, длине пролета, равной 60 м, и

весе подвесок главных путей $g_{\text{гл}} = 296$ кгс, станционных $g_{\text{гл}} = 230{,}6$ кгс. Также расчет проведется для среднего блока жесткой поперечины, так как на схеме видна его большая загруженность.

Таким образом, изгибающий момент от веса подвесок будет равен:

$$M(G) = 0{,}5(296 \cdot 2{,}5 + 230{,}6 \cdot 11{,}12 + 230{,}6 \cdot 16{,}42) + 0{,}5(296 \cdot 3{,}3 + 230{,}6 \cdot 12{,}29)$$

$$M(G) = 5744{,}77 \text{ кгс} \cdot \text{м}$$

Затем считают изгибающий момент от всех внешних сил, вычисляющийся по формуле:

$$M^P = 0{,}138 L_{\text{ф}}^2 g_p + 0{,}15 P_p L_{\text{ф}}^2 \frac{h}{b} t + 1{,}1 M(G) \quad (2)$$

где $L_{\text{ф}}$ – фактическая длина ригеля, м;

g_p – распределенная линейная нагрузка от собственного веса ригеля, кгс/м (для рассматриваемого ригеля $g_p = 40{,}05$ кгс/м);

P_p – нагрузка на поперечину от ветра максимальной интенсивности, кгс/м:

$$P_p = \gamma v_{max}^2 = 0{,}048 \cdot 23{,}6^2 = 26{,}73 \text{ кгс/м}$$

v_{max} – максимальная скорость ветра, м/с;

γ – коэффициент, зависящий от марки поперечины (для рассматриваемого ригеля $\gamma = 0{,}048$);

$\frac{h}{b}$ – отношение высоты к ширине жесткой поперечины (для рассматриваемого ригеля $\frac{h}{b} = 1{,}66$);

t – коэффициент, учитывающий распределение давления ветра вдоль пути между горизонтальными плоскостями поперечины (t = 1,33).

Тогда

$$M^P = 0{,}138 \cdot 34{,}01^2 \cdot 40{,}05 + 0{,}15 \cdot 26{,}73 \cdot 34{,}01^2 \cdot 1{,}66 \cdot 1{,}33 + 1{,}1 \cdot 5744{,}77$$

$$M^P = 22951{,}24 \text{ кгс} \cdot \text{м} < 33618 \text{ кгс/м}$$

При проверке по максимальному значению изгибающего момента ригеля жесткой поперечины можем удостовериться в выбранном типе конструкции.

Нормативно-унифицированный метод расчета [2] заключается в формуле:

$$M^P = 1{,}1 \cdot K_1 L_p^2 q_1 + 1{,}2 \cdot K_1 q_w L_p^2 \frac{h}{b} t + 1{,}1 \cdot M(P) + 1{,}1 \cdot M(P)_{\text{ст}} + 1{,}1 \cdot M(T)_{\text{ст}} \quad (3)$$

где $K_1 = 0{,}125$ – поправочный коэффициент для середины пролета ригеля;

L_p – фактическая длина ригеля, м;

q_1 – распределённый собственный вес ригеля, кгс/м ($q_w = 40{,}05$ кгс/м);

q_w – распределенное давление ветра на ригель, кгс/м ($q_w = 20{,}39$ кгс/м);

$\frac{h}{b}$ – отношение высоты к ширине жесткой поперечины (для рассматриваемого ригеля $\frac{h}{b} = 1{,}66$);

t – коэффициент, учитывающий распределение давления ветра вдоль пути между горизонтальными плоскостями поперечины (t = 1,33).

$M(P)$ – момент от веса подвески, кгс·м;

$M(P)_{\text{ст}}$ – момент в месте крепления стойки от веса подвесок, кгс·м;

$M(T)_{\text{ст}}$ – момент в месте крепления стойки от тяжения подвесок, кгс·м.

Как показано в формуле, многие величины используются в обоих методах, поэтому их повторный расчет не будет производиться. Таким образом, изгибающий момент от сил, приложенных к ригелю, будет равен:

$$M^P = 1{,}1 \cdot 0{,}125 \cdot 34{,}01^2 \cdot 40{,}05 + 1{,}2 \cdot 0{,}125 \cdot 20{,}39 \cdot 34{,}01^2 \cdot 1{,}66 \cdot 1{,}33 + 1{,}1 \cdot 5744{,}77 + 1{,}1 \cdot 2370{,}72 + 1{,}1 \cdot 0$$

$$M^P = 23107{,}28 \text{ кгс} \cdot \text{м} < 33618 \text{ кгс/м}$$

Проведя расчет по нормативно-унифицированному методу, можно убедиться, что выбранный тип выдержит приложенные нагрузки.

Произведенный сравнительный анализ различных методик расчета жестких поперечин контактной сети показал, что результат нахождения изгибающего момента, действующего на стальную ферму жесткой поперечины, остается схожим. Однако различия между рассматриваемыми методами есть на уровне подхода к нахождению искомой величины.

Если прийти к сравнению результатов, то аналитический метод расчета показал результат в 22951,24 кгс*м, нормативно-унифицированный – 23107,28 кгс*м. Разница полученных чисел составила 0,68%, что можно приравнять к незначительным расхождениям.

Аналитический расчет, производимый по учебному пособию А.В. Фрайфельда «Проектирование контактной сети», показал, что более ориентирован на тщательный подход к каждой рассчитываемой конструкции. В нем учитывается максимально подробно каждая из приложенных нагрузок. Такой подход обеспечивает гибкость и точность моделирования распределения нагрузок по конструкции, но требует высокой квалификации сотрудника предприятия, производящего проектирование, а также весомых трудозатрат.

В свою очередь, метод, описанный в типовом проекте №5254 ОАО ЦНИИС «Унифицированные конструкции жестких поперечин балочного типа» реализован на укрупнении нагрузок и стандартизации схем расчетов.

Такой подход позволил значительно упростить и ускорить процесс расчета конструкции, что не сказалось на результатах расчетов. Однако многие расчетные параметры в данном методе были заменены коэффициентами запаса по прочности конструкции, поэтому расчет заведомо несет увеличенные результаты расчета, что закладывает в рассчитываемую жесткую поперечину дополнительный процент надежности.

Таким образом, данные методы расчета не являются исключающими друг друга, а являются различными приспособлениями, ориентированные на разнообразные инженерные цели: детализированного анализа конструкции в случае сложного индивидуального проектирования и эффективного применения при строительстве масштабных объектов, основанного на типовых конструктивных и проектных решениях. Их комбинированное применение при проектировании позволит многократно повысить надежность конструкций и обеспечить безопасное и стабильное курсирование электроподвижного состава по железным дорогам.

Список литературы:

1. Фрайфельд А. В., Брод Г. Н. Проектирование контактной сети / А. В. Фрайфельд, Г. Н. Брод. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1991. – 335 с.
2. ОАО ЦНИИС. Унифицированные конструкции жестких поперечин балочного типа : типовой проект № 5254. – Москва, 2006. – 73 с.

УДК 621.992

Гречишников В. А., Дреев Н. В.
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ НАРУЖНОЙ РЕЗЬБЫ

Аннотация. В статье проведен сравнительный анализ основных методов формирования резьбовых поверхностей – лезвийный метод получения резьбы (точение, фрезерование, нарезание метчиками и плашками) и метод пластической деформации (накатывание). Рассмотрены как цилиндрические, так и конические резьбы. Оценка выполнялась по квалитету точности, шероховатости обработанной поверхности, производительности и применимости для различных объемов производства. Показано, что накатывание является наиболее эффективным для массового производства цилиндрических резьб из пластичных материалов, а для конических резьб оптимальным методом признано точение.

Ключевые слова: резьба, коническая резьба, точение резьбы, фрезерование резьбы, накатывание резьбы, способы обработки резьбы.

Введение

Резьбовые соединения остаются одними из наиболее распространенных в машиностроении, нефтегазовой отрасли, авиастроении и автомобилестроении. Резьбы можно разделить на два основных вида: цилиндрические и конические. Также каждый вид можно разделить на типы, в зависимости от профиля. Это могут быть резьбы с классическим треугольным профилем, трапецеидальным, прямоугольным, радиусным и другими.

В связи с широким спектром типов резьбы применяется обширный перечень инструментов для их получения. Существует три основных технологических метода: обработка лезвийным инструментом, обработка абразивным инструментом и пластическое деформирование (накатывание).

Лезвийный метод охватывает наибольший технологический диапазон получения резьбы за счет многообразия режущего инструмента. К нему относится обработка резьбы на токарных станках с помощью резцов и гребенок, обработка на фрезерных станках с помощью резьбовых фрез (дисковых, гребенчатых), обработка с помощью резьбонарезных головок, метчиками и плашками.

Метод нарезания абразивным инструментом является самым точным и дорогостоящим методом получения резьбы, что делает его неподходящим для массового производства, поэтому в данной работе этот метод не будет рассмотрен.

Сам процесс резьбонарезания характеризуется малыми сечениями среза, малыми задними углами, а следственно – повышенным трением и износом по задней поверхности инструмента [1].

Выбор метода формирования резьбы определяется не только производительностью и себестоимостью процесса, но и эксплуатационными характеристиками, такими как прочность и точность соединения. Далее рассмотрим метод пластической деформации и лезвийный метод, а именно точение резьбы, фрезерование, обработку с помощью метчиков и плашек.

Нарезание резьбы токарными резцами

Обработка данным способом производится на токарных винторезных станках, токарных автоматах и токарных станках с ЧПУ. Ключевой особенностью способа является совпадение профиля резьбовой части резца с требуемым профилем впадины на обрабатываемой детали. При обработке главное вращательное движение (заготовки или инструмента) строго синхронизируется с поступательным движением подачи для получения шага резьбы.

Резьбовые резцы могут быть цельными из быстрорежущей стали, с напайными пластинами и сборные с механическим креплением пластин. Последние получили наибольшее распространение вследствие того, что они наиболее точные и экономически выгодные, так как позволяют повысить режимы резания вплоть до 150-200 м/мин при обработке конструкционных сталей, а также позволяют обрабатывать закаленные материалы.

Нарезание резьбы происходит за несколько проходов (8-10 проходов для однониточных резцов, 3-4 прохода для сборных резцов с механическим креплением многозубых твердосплавных пластин (гребенок)).

За счет большого количества проходов (более одного) нарезание резьбы на токарных станках – низкопроизводительный способ получения цилиндрической резьбы, однако в нефтегазовой отрасли это основной способ получения труб и муфт с конической резьбой.

К преимуществам данного способа относится возможность изготовления резьбы малых серий, возможность нарезания конической резьбы, применимость для хрупких и закаленных материалов, удовлетворительная точность резьбы (IT 6-8) [2] и шероховатость поверхности (Ra 0,8-3,2) [2], возможность обработки сложных профилей и возможность нарезать многозаходные резьбы.

К недостаткам можно отнести низкую производительность, потерю материала в виде стружки, сложность отвода стружки.

Фрезерование резьбы

Обработка данным способом производится с помощью фрезерных станков, в том числе с ЧПУ. Под общим названием – фрезерование резьбы, скрыто большое количество способов, таких как: фрезерование концевыми

фрезами, торцевыми фрезами, вихревое резьбофрезерование, фрезерование резьбы методом огибания, фрезоточение [3], фрезерование дисковыми фрезами, фрезерование гребенчатыми фрезами. Последний способ наиболее распространен, поскольку в машиностроении часто встречаются резьбы с длиной, не превышающей три номинальных диаметра резьбы.

Инструмент, вращаясь вокруг своей оси, движется по винтовой траектории вокруг заготовки.

По конструкции гребенчатая фреза – многониточная фреза, каждую нитку которой можно рассматривать как отдельные дисковые фрезы на одной оси.

К преимуществам данного способа относится возможность обработки глухих отверстий, применимость для хрупких и закаленных материалов, удовлетворительная точность резьбы (IT 6-8) [2] и шероховатость поверхности (Ra 0,8-3,2) [2], образование мелкой сегментной стружки.

К недостаткам следует отнести искажение угла профиля нарезаемой резьбы (до 10 угловых минут) [4], из-за радиального отгиба резьбофрезы при силовом контакте с заготовкой возникает конусность, что является отклонением от цилиндричности. Также, монолитные твердосплавные резьбофрезы дороже сборных резцов или метчиков.

Нарезание резьбы метчиками и плашками

Обработка данным способом производится с помощью фрезерных станков с ЧПУ, универсально-сверлильных станков и токарных станков; также данные инструменты можно использовать для нарезания резьбы вручную. Метчики предназначены для нарезания внутренних резьб, а плашки для наружных. Нарезание резьбы осуществляется за счет двух совместных относительных движений: поступательного вдоль оси и вращательного. [5]

Метчик в общем виде представляет собой винт, превращенный в режущий инструмент посредством снабжения несколькими продольными канавками, образующими режущие кромки. В зависимости от назначения метчики подразделяют на машинно-ручные, ручные, гаечные, плашечные, маточные, сборные и специальные.

Процесс резьбонарезания метчиками отличается тяжелыми условиями резания, что объясняется сочетанием высоких силовых нагрузок, значительного трения в зоне контакта и затрудненной эвакуации стружки. Для конической резьбы характерно дополнительное возрастание сил резания по сравнению с цилиндрическими [6].

Плашка в общем виде представляет собой гайку, превращенную в режущий инструмент посредством снабжения осевыми отверстиями.

Сегодня на современных производствах отказываются от метчиков и плашек в пользу резьбофрез из-за повышенной производительности последних.

К преимуществам нарезания резьбы метчиками и плашками относится возможность применения на универсальном оборудовании и вручную, относительно низкая стоимость инструмента, возможность нарезания конической резьбы (для метчиков), удовлетворительная степень точности резьбы (6-7 квалитет точности для метчиков, 6-8 для плашек) [2].

К недостаткам следует отнести значительные силы резания, приводящие к быстрому износу и малой стойкости инструмента, проблематичность извлечения сломанного инструмента из отверстия, затрудненный отвод стружки, особенно в глухих отверстиях, существенные ограничения по твердости обрабатываемого материала (до 35 HRC), большая шероховатость поверхности (Ra 1,6-12,5) [2].

Накатывание резьбы

Накатывание резьбы производят на специальных резьбонакатных станках. Способ представляет собой процесс холодной пластической деформации. Накатывание резьбы, в отличие от лезвийной обработки, не сопровождается перерезанием структурных волокон материала: в поверхностном слое формируется наклеп, обусловливающий повышение усталостной прочности резьбы на 20–40 % относительно исходного состояния [7].

Накатывание осуществляется комплектом из двух или трех резьбонакатных роликов, при котором ролики вращаются синхронно, а один из роликов получает радиальное перемещение с последующей выдержкой на упоре. Направление резьбы на роликах противоположно накатываемой резьбе (т.е. для получения правой резьбы ролики должны быть с левой резьбой).

К преимуществам накатывания относится высокая стойкость инструмента (10-30 тыс. деталей), большая производительность, что отлично подходит для массового производства, повышенная прочность резьбы, хорошая точность (6-7 квалитет) [2] и низкая шероховатость (Ra 0,2-1,25) [2], отсутствие стружки.

К недостаткам следует отнести высокую стоимость оборудования и инструмента, сложность настройки станка, ограничения по накатыванию резьбы с большим шагом, невозможность получения конической резьбы стандартными методами без специальной конструкции роликов [8], существенные ограничения по обрабатываемому материалу (твердость до 400 НВ, требования к пластичности материала).

Заключение

Накатывание цилиндрической резьбы обеспечивает максимальную производительность и точность по сравнению с другими способами при условии, что материал заготовки обладает достаточной пластичностью, а объем выпуска соответствует крупносерийному или массовому производству. Метчики и плашки сохраняют актуальность в мелкосерийном и ремонтном

производстве, несмотря на низкую стойкость инструмента. Точение и фрезерование занимают нишу средней серийности и позволяют обрабатывать хрупкие и закаленные материалы.

При обработке конической резьбы основными рекомендуемыми методами выступают точение и фрезерование. Накатывание, требующее применения инструмента специальной конструкции, для данного типа резьбы имеет ограниченное распространение.

Список литературы:

1. Ординарцев И.А., Филиппов Г.В., Шевченко А.Н. и др. Справочник инструментальщика / Под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 846 с.
2. ГОСТ Р 70117-2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Шероховатость поверхности. Рекомендации по выбору. – М.: Стандартинформ, 2022. – 20 с. – Введён в действие с 01.01.2023.
3. Воронов В.Н. Теоретические основы технологии обработки резьбы винтовым инструментом с радиальной подачей: дис. ... докт. техн. наук. Тула, 1993. – С. 40. EDN: ZKNSAN
4. Мальков О.В., Карельский А.С. Обеспечение точности резьбы при фрезеровании на основе расчета перемещения инструментальной наладки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2025. – Т. 23. – № 2. – С. 88–96. DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-88-96 EDN: WQKPQK
5. Дальский А.М., Суслов А.Г., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К. (ред.). Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. – Т. 2. – 5-е изд., испр. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 941 с.
6. Баранчиков В.И., Жаринов А.В., Юдина Н.Д. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1990. – 401 с.
7. Степанов Ю. С., Афонин А. Н. Резьбообразование методами пластического деформирования. – Орёл : ОрёлГТУ, 2005.
8. Схиртладзе А. Г., Кожевников Д. В., Гречишников В. Л., Кирсанов С. В., Кокарев В. И. Технологические процессы в машиностроении : учебник для вузов. – М. : Машиностроение, 2007. – 526 с. ISBN 978-5-217-03373-7

УДК 621.45

Ильинская О. И., Поперечный С. С.
Московский авиационный институт, Москва, Россия

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается один из основных инструментов развития отечественного авиационного двигателестроения – цифровой двойник. В эпоху повсеместного развития и применения информационных технологий и внедрения их в такие сферы деятельности общества как производственная, учебная, коммуникационная и другие появилась тенденция по внедрению и активному использованию технологий виртуальной реальности в трудоемкой и наукоемкой отрасли производства авиационных двигателей. Применение такого рода технологий обеспечит отечественным предприятиям возможность сокращения сроков и затрат на разработку, создание первого серийного образца и сертификацию авиационного двигателя.
Ключевые слова: Цифровой двойник, газотурбинный двигатель, испытания, надежность, технология.

Введение

Создание газотурбинного двигателя – сложнейший с конструкторской и технологической точек зрения процесс организации производства силовой установки (СУ) для решения задач авиационной, энергетической и нефтегазовой промышленностей.

Наиболее высокие требования предъявляются к СУ в авиационной промышленности. Авиационные двигатели напрямую задействованы в обеспечении пассажиро- и грузоперевозок. Также различаются они и по области применения: СУ для военных самолетов/вертолетов, СУ для гражданских и транспортных самолетов/вертолетов, СУ для БПЛА.

К изделиям военного и гражданского назначения предъявляются различные требования. Требования к изделиям гражданского назначения регламентированы федеральными авиационными правилами и регулируются Росавиацией.

Важным этапом при создании авиационного двигателя является его испытания. Последним рубежом перед окончанием опытно-конструкторских работ (ОКР) являются сертификационные испытания. По результатам этих испытаний принимается решение о допуске к использованию двигателя в качестве СУ летательного аппарата.

На этапе ОКР осуществляется проектирование конструкции авиационного двигателя в соответствии с требованиями технического задания (ТЗ) заказчика, отладка технологий изготовления, проводятся тепловые и

прочностные расчеты, испытания узлов и агрегатов по отдельности и в составе СУ, различные испытания опытного образца на испытательных стендах и летающей лаборатории.

Разработка конструкции двигателя летательного аппарата (ДЛА) осуществляется в системах автоматизированного проектирования CAD (Computer-Aided Design) и CAE (Computer-Aided Engineering).

CAD — это системы, предназначенные для автоматизированного проектирования. Они позволяют создавать геометрические модели изделий (двумерных или трёхмерных), оформлять конструкторскую и/или технологическую документации.

CAE — это системы автоматизации инженерных расчётов, анализа и симуляции физических процессов. Они позволяют виртуально оценить характеристики проектируемых изделий в реальных условиях эксплуатации, проверить работоспособность конструкции и оптимизировать её.

Современные CAD-системы часто интегрируются с CAE-системами, что позволяет проводить инженерный анализ непосредственно после создания геометрической модели в CAD. Это сокращает время разработки, затраты на физические испытания и помогает выявлять потенциальные проблемы на ранних стадиях проектирования.

В описании технологий изготовления деталей и сборочных единиц (ДСЕ) ДЛА и формировании технологических карт, также задействованы различные автоматизированные системы. Тепловые и прочностные расчеты проводятся в расчетных средах, позволяющих с помощью математического моделирования для заданных граничных условий, получить результаты в цифровой среде, не проводя натурные испытания.

Актуальность

В настоящее время происходит быстрое развитие информационных технологий, в частности прикладных программных обеспечений, и внедрение искусственного интеллекта (ИИ).

В отрасли современного двигателестроения для создания газотурбинных двигателей нового поколения требуется всесторонняя технологическая подготовка производства, с которой связаны циклы освоения и выпуска продукции, а также в конечном итоге эксплуатационная надежность изделия и его себестоимость. Надежность и ресурс газотурбинного двигателя летательного аппарата в значительной степени зависят от качества изготовления деталей. [2]

В связи с этим многими зарубежными, отечественными учеными ведется серьезная работа по эффективному управлению проектами с использованием концепций бережливого, активного производства, в том числе концепции цифрового двойника (ЦД).

Для авиационной промышленности такой инструмент наиболее актуален, т.к. в первую очередь рассматривается безопасность полетов. Нельзя ни сказать о колоссальных затратах на разработку, производство и испытания опытных образцов проектируемого двигателя, количество которых одновременно на момент принятия решения об улучшении конфигурации может достигать 8-10 шт. Окупаемость затрат на АД в среднем возможна после 5 лет эксплуатации, что указывает на отсутствие возможности финансирования последующих проектов.

Внедрение ЦД позволяет объединить усилия конструкторов, технологов и расчетчиков за счет прозрачности разработки двигателя с возможностью быстрого совместного реагирования на получаемые результаты расчета.

Цифровой двойник

Термин цифровой двойник впервые появился в 2002 году в докладе, посвящённом управлению жизненным циклом продукта, профессора Мичиганского университета Майкла Гривза. Гривз предложил следующее определение: ЦД представляет собой набор виртуальных информационных конструкций, которые полностью описывают потенциальный или реальный физически производимый продукт от микроатомного до макрогеометрического уровня [1]. Профессор Гривз выделяет три ключевых компонента ЦД:

1.физический объект;

2.виртуальное представление этого объекта;

3.двунаправленный канал связи для передачи данных от физического объекта к виртуальному и обратно.

Позже Гривз расширил концепцию и ввел дополнительные понятия:

- прототип цифрового двойника - содержит информационные наборы, необходимые для описания и создания физической версии объекта;
- экземпляр ЦД - описывает конкретный физический продукт, с которым ЦД связан на протяжении всего срока службы;
- агрегатор ЦД - совокупность всех двойников-экземпляров.

Концепция ЦД предполагает динамическое взаимодействие между физическими и виртуальными объектами. Так данные, полученные в реальном времени с датчиков или других источников (оператор, информационные системы, результаты работы других ЦД, окружающая среда и т.д.), обновляются в виртуальной модели, а результаты анализа этих данных могут использоваться для оптимизации процессов, прогнозирования и принятия решений.

К преимуществам применения цифровых двойников можно отнести:

- возможность создавать тщательно проработанные реальные изделия, поскольку все этапы их разработки собраны в одной цифровой среде;

- непрерывное улучшение и доработку физического объекта на протяжении всего срока его службы;
- уменьшение вероятности внезапных дорогостоящих поломок благодаря постоянному отслеживанию состояния объекта — сведения о его работе регулярно поступают и наглядно отражаются в виртуальной копии;
- сокращение расходов на производство, так как на цифровой модели можно провести нужные проверки и испытания без выпуска реального опытного образца [2].

Помимо явных преимуществ, у цифровых двойников имеются и слабые стороны:

- необходимо постоянное интернет-подключение к реальному объекту для обмена данными (особенно если информация должна поступать без задержек);
- требуется недешёвое оснащение как для создания виртуальной копии, так и для дальнейшей работы с ней;
- требуется надёжная защита всей используемой информации.

Развитие математического моделирования и рост вычислительных мощностей приводит ко все большему внедрению на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) авиационных ГТД и силовых установок цифровых технологий и связанных с ними подходов [3].

Цифровые технологии возможно условно поделить на две категории: математическое моделирование и автоматизация процессов. На всех стадиях жизненного цикла газотурбинных двигателей эти две группы технологий активно применяются и тесно связаны друг с другом.

Главное назначение математического моделирования — уточнение облика изделия в ходе проектирования, а также прогнозирование характеристик самого двигателя, его систем, узлов, деталей и сборочных единиц во время испытаний и эксплуатации. Помимо этого, в последнее время математические модели (ММ) всё чаще используют для анализа и прогнозирования технологических процессов, задействованных при изготовлении ГТД (аддитивные технологии, литьё, сборка и т.д.). Такая замена натурных экспериментов расчётами позволяет сократить время и затраты, одновременно повышая качество работ, выполняемых на протяжении всего жизненного цикла изделия.

Каждый этап ЖЦ ГТД (проектирование, испытания, производство, эксплуатация и пр.) обладает своей спецификой и существенно отличается от остальных. По этой причине цифровые технологии, применяемые на разных стадиях жизненного цикла двигателя, также имеют выраженные особенности и серьёзно различаются между собой.

На этапе испытаний и сертификации особенно важной становится возможность ММ точно спрогнозировать результаты экспериментов, а также

автоматизации самих испытательных процедур, сбора, обработки, архивирования и анализа получаемых данных. Поэтому виртуальные стенды, предназначенные для испытаний, с учётом специфики испытываемого объекта и реального стенда должны представлять собой высокоточные многодисциплинарные модели, прошедшие верификацию и валидацию.

Для авиационных ГТД из-за сложности протекающих в них процессов, высокой стоимости и длительности натурных испытаний особенно актуальна разработка, верификация и валидация достоверных многодисциплинарных трёхмерных моделей, способных подтверждать требуемые характеристики без масштабных экспериментов.

Модификации (даже небольшие изменения), внесённые в конструкцию или режим работы одного узла (или детали), могут заметно повлиять на функционирование всего двигателя. Это приводит к необходимости локальной корректировки проекта и повторного расчётного согласования всех его систем и узлов. Для этого требуется оперативно вернуться к стадии эскизного проектирования, быстро провести глобальный расчётный анализ того, как внесённые изменения отразятся на двигателе в целом, на его системах и узлах, и при необходимости локально перепроектировать несогласованный элемент.

Чтобы выполнять такую процедуру регулярно, нужно обеспечить быструю и корректную параметризацию используемых ММ и автоматизировать процессы их изменения, анализа и взаимодействия.

В технологию ЦД также должны входить цифровые технологии интеграции с другими технологическими и информационными платформами, разрабатываемыми, получаемыми и применяемыми на всех этапах ЖЦ изделия.

Такая совокупность цифровых технологий, объединенных в одну систему – должна гарантировать взаимосвязь и преемственность моделей, их верификацию, валидацию и интеграцию с данными, а также с технологическими и информационными платформами, которые создаются, собираются и применяются на всех этапах ЖЦ ГТД: разработка, испытания, сертификация, изготовление, эксплуатация (включая сервисное обслуживание) и утилизация.

Система строится на модульной цифровой платформе. Каждый модуль соответствует одному из основных этапов жизненного цикла изделия и объединяет модели, данные и документы с учётом особенностей этого этапа.

Рассмотрим модули цифровой платформы, отвечающие ключевым стадиям ЖЦ авиационного двигателя и требующие наибольших финансовых затрат.

1) Модуль конфигурации изделия. Он содержит структурированный набор CAD-моделей и историю их изменения в процессе проектирования: от

упрощённых обобщённых чертежей, характерных для этапа эскизного проекта, и базовых трёхмерных CAD-моделей узлов и деталей, используемых при техническом проектировании, до полной технической и конструкторской документации итоговой конфигурации (состав изделия, рабочая конструкторская документация, оцифрованные детали и сборочные единицы, сборки и т.д.).

2) Модуль цифрового сопровождения испытаний предназначен для расчётного прогнозирования результатов испытаний, проводимых с целью подтверждения заявленных характеристик ГТД и его сертификации.

Модуль также включает методики создания, верификации и валидации этих моделей, сами результаты испытаний, историю их подготовки и проведения, способы обоснования перед сертифицирующими органами возможности уменьшения объёмов (или полной замены для простых деталей и сборочных единиц) испытаний за счёт моделирования, а также специализированное программное обеспечение, служащее для взаимодействия и интеграции с ПО и сервисами испытательного оборудования и базами данных. Кроме того, в состав модуля цифрового сопровождения испытаний должен входить блок управления стратегией сертификации. Опираясь на накопленный опыт сертификации похожих изделий, он выстраивает оптимальную последовательность сертификационных испытаний и определяет необходимую и обоснованную степень сокращения их объёмов благодаря математическому моделированию.

3) Модуль цифрового сопровождения эксплуатации. Его главная задача — задействовать ММ и другие цифровые технологии для быстрого (порой практически мгновенного) расчёта или прогнозирования характеристик ГТД в целом и каждой его системы, узла, детали и сборочной единицы во время эксплуатации в соответствии с утвержденными методиками.

Поскольку каждый отдельный модуль отвечает за цифровое сопровождение конкретного этапа ЖЦ ГТД, он хранит историю развития цифровых двойников: эволюцию моделей, применяемых на этом этапе, процесс их уточнения и валидации на основе реальных данных, полученных при испытаниях или в ходе эксплуатации, а также постоянно пополняемые базы данных. При этом все изменения, вносимые в цифровой двойник, относятся к конкретным экземплярам двигателя и поэтому должны фиксироваться в двойнике экземпляра с привязкой к реальному времени его создания, испытаний, эксплуатации и т.д.

ЦД могут стать той прорывной технологией, которая объединит в рамках единого цифрового пространства всю совокупность ММ, различных цифровых сервисов и многообразие данных, создаваемых, получаемых и используемых в течение всего ЖЦ ГТД. Такое объединение, аккумулируя весь накопленный опыт проектирования и доводки двигателей, приведет к

лучшему пониманию того, что происходит с ГТД на различных этапах его ЖЦ, поможет в улучшении эксплуатационных характеристик, сократит время на его разработку и сертификацию, а также снизит себестоимость производства и эксплуатации авиационных двигателей.

Список литературы:

1. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. [Электронный ресурс]. URL: https://theengineer.markallengroup.com/production/content/uploads/2014/12/Digital_Twin_White_Paper_Dr_Grieves.pdf (дата обращения: 15.03.2026).

2. Ташкинов, А.Г. Управление проектами с использованием концепции цифрового двойника в авиадвигателестроительном предприятии / А.Г. Ташкинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2023. – № 74. – С. 83–95. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.74.08.

3. Сальников А.В., Гордин М.В., Шмотин Ю.Н., Никулин А.С., Макаров П.В., Французов М.С. Цифровые двойники — платформа для управления жизненным циклом авиационных двигателей. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2022, № 4, с. 60–72, DOI: 10.18698/0536-1044-2022-4-60-72.

УДК 004.94:69.05

Корендясова В. В.
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЛЫМИ КОМПЛЕКСАМИ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ 6D-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается подход к автоматизации управления жилыми комплексами на основе внедрения концепции 6D-моделирования, интегрирующей геометрические, временные, стоимостные и эксплуатационные данные в едином информационном пространстве. Предложена комплексная модель, охватывающая техническое обслуживание, управление инженерными системами, финансовые расчеты и взаимодействие с собственниками. Проанализированы проблемы внедрения, включая высокую стоимость наполнения модели для существующего жилого фонда, низкую цифровую готовность персонала и несовершенство нормативной базы, а также определены пути их преодоления. Обоснована экономическая целесообразность применения 6D-модели для повышения прозрачности, эффективности и надежности эксплуатации многоквартирных жилых комплексов.

Ключевые слова: 6D-моделирование, информационное моделирование зданий, автоматизация управления, жилой комплекс, жизненный цикл объекта, управляющая организация, цифровой двойник, жилищно-коммунальное хозяйство.

Современный этап развития жилищно-коммунального хозяйства характеризуется нарастающей сложностью управленческих задач. Объекты жилой недвижимости, представляющие собой многоквартирные жилые комплексы с подземными паркингами, встроенно-пристроенными помещениями, инженерным оборудованием и придомовой территорией, требуют постоянного мониторинга технического состояния, планирования ремонтов, учета потребления коммунальных ресурсов и организации расчетов с пользователями. Традиционные подходы к управлению, базирующиеся на бумажном документообороте и фрагментарной автоматизации, приводят к потере данных, задержкам в принятии решений и росту эксплуатационных издержек.

Выходом из сложившейся ситуации выступает технология информационного моделирования, получившая развитие в концепции многомерного моделирования. Наибольший потенциал для автоматизации управления жилыми комплексами несет модель 6D, которая включает в себя три геометрических измерения, четвертое измерение – время (календарное планирование), пятое измерение – стоимость (сметные расчеты) и шестое

измерение – управление жизненным циклом, включая эксплуатацию, техническое обслуживание и утилизацию. Применительно к жилым зданиям шестое измерение приобретает критическое значение, поскольку продолжительность эксплуатационной фазы достигает нескольких десятилетий, и именно на этом этапе формируется основная масса затрат собственников и управляющих организаций.

В основе предлагаемой модели лежит принцип единого информационного пространства. Под единым информационным пространством понимается совокупность баз данных, программных интерфейсов и регламентов обмена, обеспечивающая непротиворечивость, полноту и доступность информации для всех участников процесса управления: управляющей организации, товарищества собственников жилья, ресурсоснабжающих предприятий, органов государственного жилищного надзора и собственников помещений [1].

Информационная модель здания в контексте 6D представляет собой не просто трехмерную геометрию, а семантически обогащенную структуру, где каждый элемент – от несущей стены до запорной арматуры – имеет уникальный идентификатор, паспортные данные, сведения о материале, дате монтажа, гарантийном сроке, перечне регламентных работ и истории обслуживания. Такая модель становится цифровым двойником жилого комплекса, позволяющим имитировать различные сценарии эксплуатации, прогнозировать отказы оборудования и оптимизировать расход ресурсов. Методологическим фундаментом служат стандарты информационного моделирования, адаптированные к российской нормативной базе. В частности, Градостроительный кодекс устанавливает правовые основы применения информационных моделей на всех этапах жизненного цикла объектов капитального строительства. Жилищный кодекс определяет обязанности управляющих организаций по предоставлению достоверных сведений о состоянии общего имущества и произведенных работах. Подзаконные акты, включая приказы Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства, регламентируют состав сведений, включаемых в информационную модель объекта недвижимости [2].

Разработанная комплексная модель включает пять взаимосвязанных уровней. Первый уровень – уровень сбора данных. Здесь формируются первичные потоки информации, поступающие от датчиков и измерительных приборов, систем диспетчеризации инженерного оборудования, а также от пользователей через мобильные приложения и веб-интерфейсы. В качестве источников данных выступают автоматизированные узлы учета тепловой энергии, холодной и горячей воды, электроэнергии, датчики дыма, протечки, контроля доступа, видеонаблюдения.

Второй уровень – уровень хранения и интеграции. Данные в унифицированных форматах консолидируются в центральной базе данных, организованной по принципу объектно-реляционного отображения. Каждый физический объект жилого комплекса сопоставляется с его цифровым представлением в 6D-модели. Интеграция разнородных систем обеспечивается через шлюзы и адаптеры, реализующие протоколы промышленной автоматизации. Третий уровень – уровень обработки и анализа. Здесь действуют модули технической диагностики, прогнозной аналитики, оптимизации ресурсопотребления и планирования работ. Применяются алгоритмы машинного обучения для выявления аномалий в работе инженерных систем. Четвертый уровень – уровень принятия решений и диспетчеризации. На основе обработанных данных формируются управленческие команды: открытие или закрытие задвижек, изменение параметров микроклимата, включение резервных насосов. Также генерируются уведомления для персонала с указанием местоположения неисправности на трехмерной модели. Пятый уровень – уровень взаимодействия с собственниками и контролирующими органами. Через личные кабинеты, порталы и мобильные приложения собственники получают актуальную информацию о показаниях приборов, плановых и аварийных отключениях, расходе средств на содержание общего имущества. Контролирующие органы получают автоматизированную отчетность по установленным формам.

Применение разработанной модели позволяет автоматизировать широкий спектр процессов, традиционно требующих значительных трудозатрат. В области технической эксплуатации автоматизации подлежат процессы ведения паспортов жилого здания и элементов общего имущества. Каждый лифт, мусоропровод, вентиляционная шахта, тепловой узел имеют свою цифровую карту, связанную с трехмерным расположением. При наступлении планового срока технического обслуживания система автоматически формирует задание для инженерной службы и контролирует его исполнение.

В сфере управления инженерными системами 6D-модель позволяет осуществлять автоматизированный контроль параметров теплоносителя, давления в системе холодного водоснабжения, напряжения в электрических щитах. Отклонение параметров за пределы допустимых значений немедленно отображается на модели цветовым кодированием, и система выдает рекомендацию по локализации неисправности. Например, падение давления на участке трубопровода визуализируется красным цветом, а система предлагает ближайшие запорные арматуры для отсечения участка [3].

В области финансово-хозяйственной деятельности автоматизация охватывает процессы начисления платы за жилое помещение и коммунальные

услуги. Интеграция с общедомовыми и индивидуальными приборами учета позволяет автоматически формировать счета с разнесением расходов на содержание общего имущества пропорционально площади помещения. Шестое измерение модели обеспечивает прозрачность структуры тарифа, поскольку каждый вид работ по содержанию и ремонту имеет привязку к конкретному элементу модели с указанием фактических затрат. Взаимодействие с собственниками также автоматизируется через систему электронных обращений. Заявка на устранение неисправности, поданная через мобильное приложение, автоматически регистрируется в диспетчерской службе, привязывается к точному местоположению на модели жилого комплекса и передается исполнителю. Собственник в режиме реального времени видит статус исполнения, а после завершения работы получает отчет с фотофиксацией.

Внедрение комплексной модели автоматизации требует начальных капитальных затрат на приобретение лицензий на программное обеспечение, оснащение жилого комплекса приборами учета и датчиками, обучение персонала и реорганизацию документооборота. Однако в долгосрочной перспективе достигается существенное снижение операционных расходов. Исключаются потери от неучтенного потребления ресурсов за счет постоянного мониторинга. Сокращаются затраты на аварийные ремонты благодаря переходу к планово-предупредительной системе обслуживания на основе прогнозной аналитики. Уменьшаются трудовые затраты диспетчерских и бухгалтерских служб за счет автоматизации рутинных операций. По расчетным данным, выполненным для типового жилого комплекса на двенадцать многоквартирных домов, срок окупаемости внедрения 6D-модели составляет от двух до трех лет. При этом снижение эксплуатационных издержек достигает двадцати пяти процентов, а сокращение времени устранения аварийных ситуаций – до пятидесяти процентов за счет точной локализации места неисправности [4, 6].

Ключевыми проблемами внедрения комплексной модели автоматизации выступают высокая стоимость первичного наполнения данными существующего жилого фонда советского и постсоветского периодов вследствие утраты или фрагментарности паспортных сведений, низкая готовность управленческого персонала к цифровой трансформации из-за привычного бумажного документооборота, а также несовершенство нормативной базы в части признания автоматически сформированных электронных документов равнозначными бумажным, что требует дублирования отчетности. Решением данных проблем служат поэтапное оцифровывание с приоритетом наиболее ответственных элементов конструкции, разработка программ повышения квалификации и введение в профессиональные стандарты компетенций в области информационного

моделирования, а также дальнейшее развитие системы межведомственного электронного взаимодействия и перевод всех регламентных процедур в цифровой формат [5].

Таким образом, проведенное исследование подтверждает, что разработка и внедрение комплексной модели автоматизации процессов управления жилыми комплексами на основе концепции 6D-моделирования позволяет обеспечить переход к единому информационному пространству, объединяющему технические, временные, стоимостные и эксплуатационные данные на всем протяжении жизненного цикла объекта. Предлагаемый подход способствует повышению прозрачности финансово-хозяйственной деятельности управляющих организаций, снижению аварийности за счет перехода к планово-предупредительному обслуживанию, оптимизации ресурсопотребления и улучшению взаимодействия с собственниками помещений. Несмотря на наличие организационных, кадровых и нормативно-правовых барьеров, практическая реализация 6D-модели признается экономически целесообразной и технически достижимой, что открывает перспективы для ее широкого применения в сфере управления многоквартирными жилыми комплексами.

Список литературы:

1. Кривошейцева Е. А., Корницкая М. Н. 4D моделирование зданий с использованием Autodesk Navisworks // Ползуновский альманах. – 2022. – № 1. – С. 94-96. EDN: HLQWZG
2. Матвеева М. В., Адегбола А. А. А. К вопросу организации процессов 4D-моделирования и управления ими в строительстве // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2022. – Т. 12. – № 2 (41). – С. 190-195. DOI: 10.21285/2227-2917-2022-2-190-195 EDN: QVZRKL
3. Гусева Г.В. Технологии информационного моделирования в строительстве: российский опыт, проблемы и перспективы // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2025. – № 7-1. – С. 67-72. DOI: 10.17513/vaael.4224 EDN: YFRRFP
4. Городнова, Н. В. Применение BIM-технологий в цифровой экономике: мировой опыт и российская практика / Н. В. Городнова, В. А. Лемеза // Экономика, предпринимательство и право. – 2022. – Т. 12. – № 8. – С. 2241-2260. DOI: 10.18334/epp.12.8.115082 EDN: XSISOS
5. Савина А. Г., Малявкина Л. И., Савин Д. А. Теоретико-методологические основы построения цифровой инфраструктуры управления объектами капитального строительства на базе BIM // Russian Journal of Economics and Law. – 2023. – Т. 17, № 1. – С. 90–109. DOI: 10.21202/2782-2923.2023.1.90-109 EDN: QYKYOC
6. Внедрение цифрового управления проектами строительства и эксплуатации энергоэффективных жилых домов / В. П. Грахов [и др.] // Наука и техника. – 2021. – Т. 20. – № 1. – С. 66-74. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-1-66-74 EDN: LNZUKS

УДК 681.5

Козлов Н. С.
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия

ВЛИЯНИЕ DDOS-АТАК НА ВРЕМЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ И ПЕРЕРЕГУЛИРОВАНИЕ В ЗАМКНУТЫХ КОНТУРАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ РОБОТАМИ

Аннотация. В работе рассмотрено влияние распределенных атак типа «отказ в обслуживании» на динамические характеристики замкнутых контуров управления промышленными роботами. Показано, что DDoS-атаки, вызывая переменные задержки и потери пакетов, приводят к критическому увеличению времени регулирования и росту перерегулирования. На основе реальных экспериментальных данных продемонстрированы нарушения работы роботов: остановки движений, замедление, рассогласование с конвейерным оборудованием. Предложен комплекс мер защиты, включающий фильтрацию трафика, сегментацию сети и резервирование ресурсов. Сделан вывод о необходимости разработки специализированных регуляторов, адаптивных к сетевым возмущениям.

Ключевые слова: промышленный робот, замкнутый контур управления, DDoS-атака, время регулирования, перерегулирование, переменная задержка, промышленная кибербезопасность.

Современное промышленное производство характеризуется глубокой интеграцией робототехнических систем в единое информационно-управляющее пространство. Промышленные роботы, оснащенные сетевыми интерфейсами, все чаще управляются удаленно через протоколы промышленного интернета вещей. Такая архитектура, обеспечивающая гибкость и масштабируемость производства, одновременно создает уязвимости, ранее не свойственные классическим системам с жесткой проводной связью. Одной из наиболее серьезных угроз становится целенаправленное информационное воздействие в виде распределенной атаки типа «отказ в обслуживании». Важно понимать, что DDoS-атака на систему управления промышленным роботом принципиально отличается от аналогичной атаки на традиционный информационный сервер. В случае робототехнической системы атака воздействует не просто на доступность сервиса, а на динамические свойства замкнутого контура регулирования. Как отмечается в современных исследованиях, атаки типа «отказ в обслуживании» на промышленные системы управления приводят к возникновению значительных флуктуаций задержки (delay jitters) и потерям пакетов данных, что критически сказывается на устойчивости системы управления.

В теории автоматического управления под временем регулирования понимается интервал времени, по истечении которого отклонение регулируемой

величины от установившегося значения становится и остается меньше заданной величины (обычно двух или пяти процентов). Перерегулирование представляет собой максимальное отклонение регулируемой величины от установившегося значения, выраженное в относительных единицах или процентах [1].

Для большинства промышленных роботов, выполняющих высокоточные технологические операции, предъявляются жесткие требования к указанным показателям. Типичные нормы для операций сборки, сварки или фрезеровки предполагают время регулирования не более нескольких сотен миллисекунд и перерегулирование, не превышающее десяти-пятнадцати процентов. Выход за эти пределы ведет к браку продукции, столкновениям робота с элементами оснастки или аварийным остановам производственной линии. При нормальной работе сетевой канал вносит фиксированные малые задержки, которые учитываются при настройке регулятора. Контроллер робота рассчитывает управляющее воздействие на основе текущих данных о положении исполнительных звеньев. В условиях DDoS-атаки картина принципиально меняется.

Распределенная атака типа «отказ в обслуживании» представляет собой целенаправленную перегрузку сетевых ресурсов большим количеством ложных запросов от множества скомпрометированных устройств. В контексте промышленной робототехники атака может быть направлена на различные элементы инфраструктуры: сетевые коммутаторы, программируемые логические контроллеры, человеко-машинные интерфейсы или непосредственно на контроллер робота.

Как верно отмечает Котков М. А., с математической точки зрения, замкнутая система управления с обратной связью превращается в систему с переменным запаздыванием. Классические уравнения движения исполнительных осей робота дополняются блоком переменной задержки в цепи обратной связи. При малых задержках система сохраняет устойчивость, но переходные процессы растягиваются – время регулирования возрастает. При достижении задержкой критического значения возникают автоколебания, проявляющиеся в виде повторяющихся превышений регулируемой величины. Особую опасность представляет то, что DDoS-атака создает не постоянную задержку, а случайный процесс потери пакетов с переменной интенсивностью. Как показано в исследованиях, даже кратковременные атаки типа SYN-флуд, при которых злоумышленник отправляет множество запросов на установление соединения, могут привести к тому, что целевое устройство начинает реагировать на легитимный трафик замедленно или перестает отвечать вовсе [2].

Распределенные атаки типа «отказ в обслуживании» оказывают прямое дестабилизирующее воздействие на временные характеристики замкнутых систем управления промышленными роботами, в первую очередь на показатель времени регулирования. Механизм этого влияния обусловлен перегрузкой

сетевых интерфейсов, серверного оборудования и вычислительных ресурсов контроллера избыточным объемом паразитного трафика. В результате возрастают задержки при передаче данных телеметрии и управляющих команд, что приводит к замедлению обработки информации в контуре обратной связи. Система управления, не получая своевременных и достоверных сведений о текущем состоянии исполнительных звеньев робота, утрачивает способность к оперативной коррекции параметров движения. Это выражается в существенном увеличении времени регулирования – интервала, за который регулируемая величина (например, угловое положение сочленения или линейная координата схвата) входит в заданную зону допуска. Особую опасность представляют объемные атаки, перегружающие канал связи, а также протокольные атаки типа SYN-флуд, истощающие ресурсы сетевого оборудования. В таких условиях алгоритмы управления, рассчитанные на детерминированные задержки, работают в режиме хронического запаздывания, что недопустимо для высокоточных производственных операций.

Одним из наиболее показательных экспериментов по воздействию DDoS-атак на реальное производственное оборудование стала серия испытаний, описанная в научной литературе за 2021 год. В ходе этих экспериментов исследователи провели пять сценариев атак на действующую производственную линию, включавшую в себя промышленных роботов, программируемые логические контроллеры и сопутствующее оборудование. Атаки включали как отраженные ICMP-флуды, так и прямые TCP SYN- и TCP ACK-флуды [3].

Результаты этого эксперимента имеют прямое отношение к обсуждаемой теме. В ходе атак наблюдались следующие нарушения в работе промышленных роботов. При атаке на определенные порты с использованием UDP-протокола робот останавливался в середине выполнения операции. Инструмент робота падал, операция рециркуляции материалов прекращалась, а сам манипулятор замирал при движении. Важно подчеркнуть, что данные сбои не были единичными – робот и его контроллер, обычно являющиеся стабильными элементами линии, выходили из строя именно при целенаправленной атаке на точно определенные порты. Одним из наблюдаемых эффектов стало замедление работы робота и заклинивание его движений. Особый интерес с точки зрения динамики управления представляет влияние атаки на несущую систему транспортировки. Контроллер, управляющий конвейерной лентой, переставал управлять приводами. Это приводило к нарушению перемещения обрабатываемых изделий. Операторы, не подозревая о кибератаке, интерпретировали эти события как механическую неисправность или проблему с электропитанием двигателей [4].

Еще одним важным наблюдением стало влияние атаки на считыватели радиочастотной идентификации на выходе робота. Система неправильно считывала и сортировала изделия, поскольку сигнал на сортировочные ворота

отсутствовал. При этом в одном из сценариев робот вообще не выполнял действие по рециркуляции материала, и бутылка не открывалась, что полностью нарушало рабочий цикл.

Важно отметить, что кибератака не всегда должна похищать данные или полностью останавливать системы для причинения вреда. Иногда достаточно сдвинуть часы. В высокоточных средах, где машины должны действовать в идеальной синхронности с точностью до микросекунд, даже небольшое расхождение во времени может привести к тому, что машины начнут неверно интерпретировать команды, пропускать сигналы безопасности или вести себя непредсказуемо. Злоумышленники могут тонко манипулировать задержками в сети, заставляя устройства «расходиться во мнениях» относительно текущего времени. Эта техника особенно опасна тем, что постепенные накапливающиеся задержки трудно обнаружить – они выглядят как «нормальные» флуктуации, но в конечном итоге приводят к деградации детерминизма и безопасности. Исследователи ранжируют манипуляции с задержкой как наиболее критический риск, поскольку постепенные инкрементальные задержки наиболее трудно выявляются и могут влиять на всю сетевую временную базу. Для замкнутого контура управления промышленным роботом это означает, что даже не являясь классической DDoS-атакой, целенаправленное внесение переменных задержек приводит к тем же последствиям: увеличению времени регулирования и росту перерегулирования.

Для минимизации воздействия DDoS-атак на время регулирования и перерегулирование в замкнутых контурах промышленных роботов необходим комплекс организационных и технических мер. Первоочередной задачей является фильтрация трафика с применением межсетевых экранов, специализированных анти-DDoS-шлюзов и систем обнаружения вторжений, способных блокировать подозрительные пакеты до того, как они достигнут контроллера робота. Важным средством защиты служит ограничение интенсивности запросов – настройка сетевого оборудования и серверов на обработку только допустимого количества пакетов в единицу времени, что предотвращает перегрузку вычислительных ресурсов. Балансировка нагрузки позволяет распределять входящий поток между несколькими резервными каналами связи или вычислительными модулями, сохраняя работоспособность контура управления даже при частичной деградации отдельных компонентов. Сегментация сети, предполагающая изоляцию критических систем управления роботами от вспомогательных сегментов и от внешних сетей, существенно снижает вероятность распространения атаки на основные контуры регулирования.

Дополнительно рекомендуется внедрение систем непрерывного мониторинга и анализа трафика на базе SIEM-решений, позволяющих обнаруживать аномалии на ранних стадиях и инициировать автоматическое

переключение на резервные ресурсы. Наличие избыточной инфраструктуры – резервных серверов, каналов связи и источников питания – обеспечивает сохранение приемлемых показателей времени регулирования и перерегулирования даже при развитии атаки. Только сочетание перечисленных мер в рамках единой политики промышленной кибербезопасности позволяет гарантировать устойчивость замкнутых контуров управления роботами к распределенным атакам типа «отказ в обслуживании» [4, 5].

Проведенный анализ позволяет утверждать, что распределённые атаки типа «отказ в обслуживании» оказывают существенное дестабилизирующее воздействие на динамические характеристики замкнутых контуров управления промышленными роботами, выражающееся в критическом увеличении времени регулирования и росте перерегулирования. Данные эффекты обусловлены внесением переменных задержек, потерями пакетов телеметрии и перегрузкой вычислительных ресурсов контроллера, что нарушает фундаментальные принципы детерминированного управления в реальном времени. Учитывая неуклонный рост числа и мощности DDoS-атак на промышленную инфраструктуру, а также недостаточность традиционных средств информационной защиты для сохранения устойчивости замкнутых контуров, дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку специализированных регуляторов, адаптивных к сетевым возмущениям, и внедрение архитектурно-аппаратных решений с динамическим резервированием каналов управления.

Список литературы:

1. Голубятников А.О. DDOS-атаки и методы борьбы с ними // E-Scio. – 2022. –№10 (73). – С. 16-21. EDN: AVFWBH

2. Котков М. А. Защита предприятия от DDoS атак на сетевом уровне // Актуальные исследования. – 2023. – №8 (138). – С. 24-26. EDN: FOEPKC

3. Данилов, А. С. Имитационное моделирование как средство выбора правил фильтрации при защите от DDoS-атак / А. С. Данилов. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2026. – № 22 (625). – С. 6-7. – URL: https://moluch.ru/archive/625/137384 (дата обращения: 06.06.26).

4. Суворов А. М., Цветков А. Ю. Исследование атак типа переполнение буфера в 64-х разрядных UNIX подобных операционных системах // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018). –2018. – С. 570-573. EDN: XWFVXF

5. Ревенков П. В. Управление рисками в условиях электронного банкинга / П. В. Ревенков ; Ин-т исслед. товародвижения и конъюнктуры оптового рынка (ОАО «ИТКОР»). – М. : ИТКОР, 2011. – 167 с. ISBN: 978-5-905735-08-0 EDN: QVEMUB

УДК 004.056+621.396

Козлов Н. С.
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия

ОЦЕНКА ДЕГРАДАЦИИ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ DDOS-АТАКЕ НА КАНАЛЫ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕМЕТРИИ

Аннотация. В работе рассматривается проблема снижения точности пространственно-временной привязки киберфизической системы в условиях деструктивного воздействия на каналы сбора и передачи телеметрической информации. Предложена методика количественной оценки деградации навигационных параметров, основанная на анализе задержек, джиттера и потерь пакетов телеметрии при распределённой атаке типа «отказ в обслуживании». Приводятся результаты имитационного моделирования для типовой архитектуры наземного роботизированного комплекса. Показано, что даже частичное подавление канала передачи данных вызывает нелинейный рост ошибки позиционирования, критичный для систем, функционирующих в реальном времени.

Ключевые слова: киберфизическая система, точность позиционирования, DDoS-атака, телеметрия, задержка передачи, деградация навигации, отказ в обслуживании, качество обслуживания.

Киберфизические системы (КФС) представляют собой интеграционные образования, в которых вычислительные ресурсы, управляющие алгоритмы и физические исполнительные механизмы объединены посредством сетей передачи данных с обратными связями по состоянию. К числу наиболее ответственных подсистем КФС относится система позиционирования, обеспечивающая определение текущих координат подвижного объекта с заданной дискретностью и точностью. Особенностью современных КФС является активное использование беспроводных каналов связи для ретрансляции телеметрической информации, включающей результаты измерений инерциальных датчиков, спутниковых навигационных приёмников и одометрии. Уязвимость беспроводного сегмента канала передачи телеметрии к преднамеренным деструктивным воздействиям является критическим фактором, ограничивающим применимость КФС в потенциально конфликтных сценариях функционирования. Среди множества типов сетевых атак особое место занимают атаки типа «отказ в обслуживании» (далее – DDoS-атаки), нацеленные на исчерпание пропускной способности канала, переполнение буферов коммутационного оборудования и внесение аномальных задержек при передаче пакетов телеметрии. В отличие от атак, подменяющих содержание сообщений, DDoS-воздействие нарушает

временную согласованность между моментом измерения навигационного параметра и моментом его поступления в управляющий вычислитель, что приводит к ошибкам экстраполяции и фильтрации координат [1].

Целью настоящей работы является разработка аналитической модели и проведение численной оценки деградации точности позиционирования типовой киберфизической системы в условиях DDoS-атаки на каналы передачи телеметрии.

В качестве объекта исследования принята мобильная КФС наземного базирования, оснащённая комбинированной системой навигации, объединяющей глобальную навигационную спутниковую систему (ГНСС), микромеханический инерциальный измерительный блок (МИИБ) и одометрические датчики. Первичные измерения формируются на борту с частотой 50 герц. Полученные данные упаковываются в дейтаграммы протокола пользовательских дейтаграмм (UDP) с приоритетной маркировкой и передаются на пост обработки по радиоканалу стандарта с множественным доступом и контролем коллизий. Управляющий вычислитель решает задачу слияния измерений на основе расширенного фильтра Калмана с постоянной частотой коррекции 10 герц. При отсутствии деструктивных воздействий латентность канала не превышает двадцати миллисекунд, что соответствует требованиям класса точности позиционирования «высокая».

Моделирование DDoS-атаки осуществлялось двумя способами: непрерывное насыщение канала ложными запросасми с превышением штатной интенсивности трафика в пять, десять и двадцать пять раз; селективное подавление пакетов телеметрии с вероятностью потери от 0,1 до 0,7. Атака генерировалась из внешнего сегмента сети с использованием распределённой ботнет-инфраструктуры, имитируемой программным стендом. Длительность каждого эксперимента составляла шестьсот секунд непрерывного воздействия при стационарном прямолинейном движении носителя со скоростью пять метров в секунду и при манёвре с изменением курса [2].

Для оценки точности позиционирования использовался показатель среднеквадратического отклонения (СКО) оценки координат от эталонной траектории, полученной по данным высокоточного дифференциального ГНСС-приёмника с погрешностью не более двух сантиметров. Деградация точности определялась как отношение СКО текущего положения к СКО, зафиксированному в штатном режиме работы канала связи. Дополнительно регистрировались интегральные показатели качества обслуживания канала: средняя задержка доставки пакета, среднеквадратическое отклонение задержки (джиттер) и коэффициент потерь.

В ходе экспериментальных прогонов были получены следующие закономерности. При увеличении интенсивности паразитного трафика в пять

раз средняя задержка доставки пакета телеметрии возросла с двадцати до восьмидесяти пяти миллисекунд, а джиттер увеличился в шесть раз. Ошибка позиционирования возросла с трёх до одиннадцати сантиметров (деградация в 3,7 раза). При десятикратном превышении штатной интенсивности задержка достигла двухсот двадцати миллисекунд, джиттер – ста пятидесяти миллисекунд, а ошибка позиционирования – тридцати одного сантиметра (деградация в 10,3 раза). Наибольший рост погрешности наблюдался в моменты изменения курса, когда фильтр Калмана вынужден отдавать предпочтение динамической модели движения перед зашумлёнными телеметрическими данными.

Селективное подавление пакетов привело к не менее выраженному эффекту. При вероятности потери пакета 0,1 ошибка позиционирования увеличилась в два раза (с трех до шести сантиметров) вследствие необходимости использования прогнозируемых значений на интервалах отсутствия измерений. При потере трёх пакетов из десяти (вероятность 0,3) ошибка достигла двадцати двух сантиметров, что превышает допустимый для большинства навигационных задач порог. Дальнейшее увеличение вероятности потери до 0,5 приводило к периодической расходимости фильтрации: управляющий вычислитель терял привязку к фактическому положению объекта, а восстановление после окончания атаки требовало от десяти до тридцати секунд, в течение которых ошибка оставалась выше одного метра [3].

Важным результатом является выявленная нелинейная зависимость деградации точности от величины джиттера. При стандартном отклонении задержки, не превышающем двадцати процентов от средней задержки, фильтр Калмана успешно компенсировал временную рассогласованность за счёт маркировки времени отправки каждого пакета. Однако при джиттере, превышающем половину периода дискретизации измерений (то есть двадцать миллисекунд при частоте 50 герц), возникали сбои в алгоритме упорядочивания измерений. В результате на вход фильтра подавались отсчёты с нарушенной хронологической последовательностью, что приводило к появлению фазового сдвига оценок относительно истинной траектории. В численном выражении при джиттере более двадцати пяти миллисекунд вклад временной неопределённости в общую ошибку позиционирования составлял не менее шестидесяти процентов.

Полученные результаты позволяют сформулировать несколько ключевых положений, касающихся уязвимости КФС к атакам типа «отказ в обслуживании» на телеметрические каналы. Первое. Даже при сохранении целостности и конфиденциальности телеметрических сообщений DDoS-атака способна полностью нарушить пространственно-временную согласованность подсистемы управления движением. Это обстоятельство принципиально

отличает КФС от традиционных автоматизированных систем, где задержки передачи данных не всегда ведут к потере качества регулирования.

Существующие методы помехоустойчивого кодирования и автоматического запроса повторной передачи (например, протокол с подтверждением доставки) оказываются малоэффективными в условиях DDoS-атаки, поскольку они сами увеличивают трафик и, следовательно, усугубляют перегрузку канала. Для КФС, функционирующих в реальном времени, повторная передача утерянного пакета телеметрии часто невозможна – к моменту его получения информация устаревает и не может быть использована для коррекции фильтра. Деградация точности позиционирования носит пороговый характер. До тех пор пока средняя задержка не превышает двух периодов дискретизации измерений (то есть сорока миллисекунд в рассматриваемой конфигурации), а джиттер остаётся ниже десяти процентов от периода дискретизации, система сохраняет приемлемую точность. Превышение указанных порогов вызывает лавинообразное нарастание ошибки, что выражается в нарушении условия сходимости фильтра Калмана. Аналитически это условие может быть записано через собственные числа матрицы ошибок: при потере более чем трети последовательных измерений или при задержке более трёх тактов матрица становится неустойчивой [4].

Применительно к практическим рекомендациям можно отметить следующее. Повышение живучести КФС при DDoS-воздействии требует не столько увеличения пропускной способности канала (что часто невозможно из-за энергетических и спектральных ограничений), сколько внедрения алгоритмов предиктивной фильтрации с адаптивным окном прогноза. В частности, при обнаружении аномального роста джиттера целесообразно переключение на режим инерциальной навигации с опорой исключительно на собственные датчики объекта – акселерометры и гироскопы. Точность такого режима, конечно, падает со временем из-за дрейфа интеграторов, но в течение первых десяти-двадцати секунд ошибка не превышает величины, характерной для деградированного канала при сильной атаке. Это позволяет выиграть время либо для смены частотного канала, либо для кратковременной остановки движения с целью восстановления координатной привязки [5].

Таким образом, в работе выполнена количественная оценка деградации точности позиционирования киберфизической системы при DDoS-атаке на каналы передачи телеметрии. На основе имитационного моделирования установлено, что даже умеренное по интенсивности деструктивное воздействие, вызывающее увеличение задержек и джиттера, приводит к нелинейному росту ошибки определения координат. При десятикратном превышении штатного трафика ошибка позиционирования возрастает более чем в десять раз, что делает невозможным выполнение целевых задач,

требующих высокой точности. Показано, что критическим параметром является не средняя задержка сама по себе, а величина джиттера относительно периода дискретизации измерений. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании отказоустойчивых КФС и разработке методов активной защиты телеметрических каналов от атак типа «отказ в обслуживании».

Список литературы:

1. Сафронова, Е. О. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования DoS атак / Е. О. Сафронова, Г. А. Жук. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2019. – № 23 (261). – С. 27-30. EDN: IUODBT

2. Басан Е. С. Методика оценки степени влияния навигационных атак на киберфизические системы / Е. С. Басан, А. А. Лесников, В. Д. Михайлова, А. Б. Могильный, М. Г. Фирсова // Вопросы кибербезопасности. – 2025. – № 2 (66). – С. 90-104. DOI: 10.21681/2311-3456-2025-2-90-104 EDN: IGLXME

3. Частикова В.А., Власов К.А., Картамышев Д.А. Обнаружение DDoS-атак на основе нейронных сетей с применением метода роя частиц в качестве алгоритма обучения // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8-4. – С. 829-832. EDN: SJMNFR

4. Исхаков А.Ю. Подход к защите интерфейсов управления киберфизической системой от угроз нарушения доступности / А.Ю. Исхаков, Е.Ф. Жарко // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 149-157. DOI: 10.25729/ESI.2023.29.1.013 EDN: QONTCM

5. Кульмамиров С. А.Современное состояние обнаружения DDOS-атак и противодействие к ним / С. А. Кульмамиров, А. А. Баймаманова, 2020. – № 4-2(60). – С. 50-57. EDN: XWMFNP

УДК 656.1:614.86

Чернов М. Н., Кочинов Ю. А.
Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова, Пермь, Россия

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ КУРЬЕРОВ НА ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТЕ

Аннотация. В статье рассматривается проблема обеспечения безопасности курьеров, использующих электротранспорт при движении по дорогам общего пользования. Проведен анализ аварийности с участием средств индивидуальной мобильности и электровелосипедов, установлены причины аварийности курьеров при движении на электротранспорте. Предложен комплекс мер по снижению аварийности и повышению уровня защищённости водителей.

Ключевые слова: безопасность курьеров, средства индивидуальной мобильности, электровелосипеды, причины аварийности, повышение безопасности.

Использование средств индивидуальной мобильности (далее – СИМ) и электровелосипедов, которые по своим техническим и эксплуатационным характеристикам достаточно схожи со средствами индивидуальной мобильности, является значимым элементом дорожного движения в современном городе. Всех пользователей данных транспортных средств можно условно разделить на три большие группы: владельцы и водители, управляющие электровелосипедами на условиях краткосрочной аренды для совершения поездок в личных целях, а также курьеры, осуществляющие профессиональные услуги в сервисе доставки. В условиях плотного транспортного и пешеходного движения в крупных городах данная категория участников дорожного движения становится одной из наиболее уязвимых.

В ежегодном информационно-аналитическом обзоре о состоянии дорожно-транспортной аварийности в Российской Федерации в 2023 году впервые отражен показатель «число погибших в ДТП с участием электровелосипедов» [1]. В обзоре отмечено, что в 2023 году зарегистрировано 10 погибших велосипедистов, которые управляли велосипедами с электродвигателем, при этом двое пострадавших являлись работниками сервисов доставки (таблица 1).

В 2024 году число погибших водителей электровелосипедов возросло до 34 человек, из них 12 человек (35%) являлись курьерами; число раненых в ДТП с участием электровелосипедов составило 1257 человек, из которых почти 50% также являлись курьерами [2]. Динамика всех показателей положительная, при этом максимальный темп роста среди анализируемых категорий имеет численность погибших работников сервиса доставки в 2024

году, что в 6 раз превышает аналогичный показатель за 2023 год.

Таблица 1 – Показатели аварийности с участием средств индивидуальной мобильности и электровелосипедов, по [1, 2]

Показатель	Годы			Темп роста 2024/2023
	2022	2023	2024	
Число погибших в ДТП с участием СИМ, чел	19	43	54	1,3
Число раненых в ДТП с участием СИМ, чел	976	3177	4591	1,4
Число погибших в ДТП с участием электровелосипедов, чел	нет данных	10	34	3,4
в т.ч. работников сервиса доставки, чел	нет данных	2	12	6,0
Число раненых в ДТП с участием электровелосипедов, чел	нет данных	нет данных	1257	-
в т.ч. работников сервиса доставки, чел	нет данных	нет данных	601	-

Одним из базовых показателей оценки аварийности мобильного электротранспорта в странах Европы является «число пострадавших в расчете на 1 млн поездок». Европейским советом по безопасности на транспорте отмечено, что «в целом снизился общий риск, связанный с использованием электронных средств», по указанному же показателю число пострадавших в расчете на 1 млн поездок в 2022 году составило 9,3 чел., что на 25,7% меньше в сравнении с 2021 годом [3]. Одновременно в Российской Федерации отмечено увеличение значения одноименного показателя на 63,8% (с 9,4 до 15,4 чел.) [2, 4].

Личное наблюдение и проведенный анализ статистических данных позволили установить основные причины аварийности курьеров при движении на электротранспорте, которые можно условно распределить на три группы.

1. Влияние «человеческого фактора».

Нарушение правил дорожного движения водителями: почти в половине ДТП с участием велосипедов и СИМ виновными являлись водители данных транспортных средств. До 25% ДТП совершается на тротуарах, пешеходных дорожках и в пешеходных зонах, а также при неправильных проездах регулируемых и нерегулируемых перекрестков, на регулируемых и нерегулируемых пешеходных переходах (рисунок). ДТП происходят также при превышении скоростного (свыше 25 км/час) режима, игнорировании сигналов светофора, движении по проезжей части в запрещенных местах и маневрировании между потоками автомобилей.

Рисунок 1 – Доля ДТП с участием велосипедов и СИМ по объектам улично-дорожной сети (среднее в 2023-2024 гг.,
построено авторами по [1, 2])

На тяжесть последствий ДТП существенное влияние оказывает недостаточный уровень подготовки и защитной экипировки водителей электрических транспортных средств. Менее 2% курьеров носят полную экипировку; более 85 % не используют шлем, наколенники, налокотники и светоотражающие элементы в темное время суток.

2. Техническое несовершенство.

Средства мобильного электротранспорта обладают конструктивными и эксплуатационными рисками. Малые габариты и «заметность» на дороге, ограниченная видимость для водителей автомобилей явились причинами того, что в 2024 году из 34-х смертельных случаев в 27-ми случаях совершен наезд механического транспортного средства на электровелосипедиста [2]. При анализе отмечены также такие недостатки, как слабые тормоза; неправильное расположение освещающих и светоотражающих элементов, особенно проявляющееся в темное время суток, в условиях дождя, снегопада, тумана; недостаточная устойчивость при движении на неровном, влажном, загрязненном и ледово-снежном покрытии дороги.

К данной группе причин аварийности движения электротранспорта можно отнести низкую степень готовности транспортной инфраструктуры, в том числе недостаточное количество выделенных полос или безопасных велосипедных дорожек, плохое состояние дорожного покрытия, тротуаров. Поскольку работа сервисов доставки осуществляется круглогодично, негативное воздействие оказывают также их плохая очистка от снега и льда.

3. Организационно-правовые причины: установленными работодателями жесткие временные нормативы сроков доставки, система

штрафов за опоздание и поощрений за скорость со стороны сервисов доставки, которые провоцируют рискованное поведение курьеров при движении; несовершенство правового регулирования в области безопасности движения СИМ и электровелосипедов.

На основе проведенного анализа предлагается комплекс мер по повышению безопасности движения водителей на мобильном электротранспорте, которые в большей части идентичны для России и Европейских стран [3, 5, 6].

Технические меры: обязательное оснащение электротранспорта габаритными огнями, указателями поворота спереди и сзади, звуковым сигналом, а также светоотражающими элементами со всех сторон; техническое ограничение максимальной скорости до 25 км/час (в Европе – до 20 км/час), а также применение более низких скоростей в пешеходных зонах с использованием геозонирования; повышение устойчивости средств электротранспорта за счет применения пневматических шин большего диаметра и ширины, использование GPS-трекеров с функцией экстренного оповещения; улучшение дорожной инфраструктуры.

Законодательно-правовое регулирование мобильного электротранспорта: введение государственного учета транспортных средств в форме реестра или регистрации с присвоением государственного номера (в настоящее время используется в Германии, Японии и некоторых других странах); правовое регулирование допуска к управлению транспортными средствами с учетом и установлением минимального возраста для водителей (в Европе - не менее 16 лет), состояния их здоровья и уровня подготовки, типа и технических характеристик СИМ и электровелосипедов и других факторов; внесение изменений в отдельные пункты Правил дорожного движения.

К данной группе мероприятий может быть отнесена также разработка регламентов по использованию защитной экипировки. В Европе планируется сделать обязательным ношение шлема для всех водителей электротранспорта. В России в организациях сервиса доставки возможно создание и популяризация системы «корпоративной безопасности», которая предполагает применение обязательной защиты: шлема, защиты суставов (налокотники и наколенники), светоотражающих элементов на одежде, перчаток с жесткими вставками.

Данная система может включать также обязательное обучение и тестирование курьеров по правилам безопасной эксплуатации мобильного электротранспорта и оказанию первой помощи; пересмотр системы мотивации - смещение акцента со скорости доставки на аккуратность и безаварийность.

Таким образом, повышение безопасности курьеров на электротранспорте требует системного подхода, объединяющего усилия

законодательства, городских властей, сервисов доставки и самих курьеров. Ключевыми направлениями являются совершенствование нормативной базы, развитие безопасной инфраструктуры, внедрение технических стандартов и формирование культуры безопасного поведения через обучение и адекватную мотивацию. Реализация предложенных мер позволит существенно снизить уровень травматизма и аварийности среди данной категории участников дорожного движения, что соответствует целям национального проекта «Безопасные качественные дороги» и повышает общий уровень безопасности в городской среде для всех участников движения.

Список литературы:

1. Баканов К. С., Ляхов П. В., Айсанов А. С., Никулин Е. Д., Исаев М. М., Коблов П. С., Царегородцева Е. А., Смирнов И. А., Наумов С. Б. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации в 2023 году : информационно-аналитический обзор. – М. : ФКУ «НЦ БДД МВД России», 2024. – 154 с. EDN: BYRSGR

2. Баканов К. С., Ляхов П. В., Айсанов А. С., Никулин Е. Д., Исаев М. М., Коблов П. С., Смирнов И. А., Царегородцева Е. А., Гавриленко А. А., Наумов С. Б. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации в 2024 году : информационно-аналитический обзор. – М. : ФКУ «НЦ БДД МВД России», 2025. – 148 с. EDN: ITIUJH

3. Road safety thematic report – Personal Mobility Devices. European Road Safety Observatory. – Brussels, European Commission, Directorate General for Transport, 2024. - URL: https://road-safety.transport.ec.europa.eu/system/files/2021-07/road_safety_thematic_report_personal_mobility_devices_tc_final.pdf (дата обращения 28.02.2026).

4. Гулый И.М. Развитие рынка услуг предоставления средств индивидуальной мобильности в России // Вопросы инновационной экономики. – 2023. – Т. 13. – № 4. – С. 2329–2338. DOI: 10.18334/vinec.13.4.120465 EDN: VRLIFL

5. Митрошин Д.В., Баканов К.С., Исаев М.М. Перспективы правового и технического регулирования использования средств индивидуальной мобильности // Безопасность дорожного движения. – 2024. – № 1. – С. 11–30. EDN: BYWPLX

6. Паршков, П. Обзор европейских практик регулирования электросамокатов // PRO Шеринг: портал. – URL: https://prosharing.ru/obzor-evropejskih-praktik-regulirovanija-jelektrosamokatov/ (дата обращения 28.02.2026).

УДК 624.15

Кузибаев Д. И.
Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФУНДАМЕНТОВ

Аннотация: В статье рассмотрены основные подходы к оценке несущей способности фундаментов зданий и сооружений. Показана роль взаимодействия основания и конструкции в формировании напряженно-деформированного состояния. Кратко описаны методы расчета по предельным состояниям и условия обеспечения надежности фундаментов. Проанализированы особенности работы фундаментов мелкого заложения и свайных конструкций. Отдельное внимание уделено влиянию характеристик грунта на несущую способность основания. Представлены основные факторы, определяющие выбор расчетной схемы и типа фундамента. Работа носит обзорный характер и систематизирует ключевые положения курса оснований и фундаментов.
Ключевые слова: несущая способность, основание, фундамент, деформации, грунт, предельные состояния, осадка.

Введение

При проектировании зданий вопрос несущей способности фундамента - один из самых критичных. Ошибки здесь проявляются не сразу, а уже в процессе эксплуатации, когда исправить что-то гораздо сложнее и дороже.

Фундамент работает не сам по себе – он всегда связан с грунтом основания. Именно это взаимодействие и определяет, как будет вести себя вся конструкция. Даже если надземная часть рассчитана идеально, слабое основание может привести к трещинам, кренам или полной потере устойчивости.

Проблема в том, что грунт – среда неоднородная и изменчивая. Его свойства зависят от влажности, структуры, глубины залегания и многих других факторов. Поэтому универсального решения здесь нет – каждый случай требует анализа [1].

Цель статьи – разобрать основные подходы к анализу несущей способности фундаментов и показать, какие факторы на нее влияют.

Задачи:

- рассмотреть принципы работы системы «основание – фундамент – сооружение»;
- описать методы оценки несущей способности;
- проанализировать особенности различных типов фундаментов;
- показать роль деформаций в расчетах.

Материалы и методы исследования

В основе анализа лежат положения строительных норм и теоретические зависимости, применяемые при расчете оснований. Используются методы расчета по предельным состояниям, которые разделяются на две группы:

- по несущей способности (исключение разрушения);
- по деформациям (ограничение осадок и перемещений).

Несущая способность основания считается обеспеченной при выполнении условия вида:

$$N \leq R$$

где $N -$ действующая нагрузка, $R -$ предельное сопротивление основания.

Для грунтовых оснований предельное сопротивление зависит от:

- угла внутреннего трения;
- сцепления;
- глубины заложения;
- размеров подошвы фундамента.

В расчетах также учитываются:

- постоянные и временные нагрузки;
- особые воздействия (например, сейсмика);
- коэффициенты надежности.

Отдельно рассматриваются деформации основания. Основное условие здесь:

$$s \leq s_{lim}$$

где $s -$ фактическая осадка, $s_{lim} -$ допустимая.

Для оценки осадок применяется метод послойного суммирования, при котором грунт рассматривается как система слоев с различными характеристиками [2].

Также используется классификация сооружений по жесткости:

- гибкие;
- абсолютно жесткие;
- конечной жесткости.

Это важно, потому что одно и то же основание по-разному влияет на разные типы зданий.

Результаты исследования

1. Влияние свойств грунта

Несущая способность напрямую зависит от характеристик грунта, на который передается нагрузка. Плотные пески и скальные грунты обеспечивают высокую несущую способность за счет своей структуры и малой сжимаемости, тогда как водонасыщенные глины и слабые грунты работают значительно хуже и склонны к деформациям уже при сравнительно небольших нагрузках.

При этом важна не только прочность, но и деформируемость грунта. Даже если условие по прочности выполняется, чрезмерные осадки могут привести к нарушению нормальной эксплуатации сооружения. Именно поэтому в расчетах учитываются оба фактора – и предельное сопротивление, и возможные деформации основания.

2. Роль деформаций

В реальных условиях чаще ограничивающим фактором становится не разрушение основания, а именно деформации. Осадки, просадки, крены и горизонтальные смещения формируют общее поведение системы «основание – фундамент – сооружение» и напрямую влияют на состояние конструкций.

На рисунке 1 представлены основные формы деформации зданий и сооружений, возникающие при неравномерных осадках фундаментов. Эти схемы наглядно демонстрируют, что деформации могут иметь разный характер и по-разному воздействовать на конструкцию.

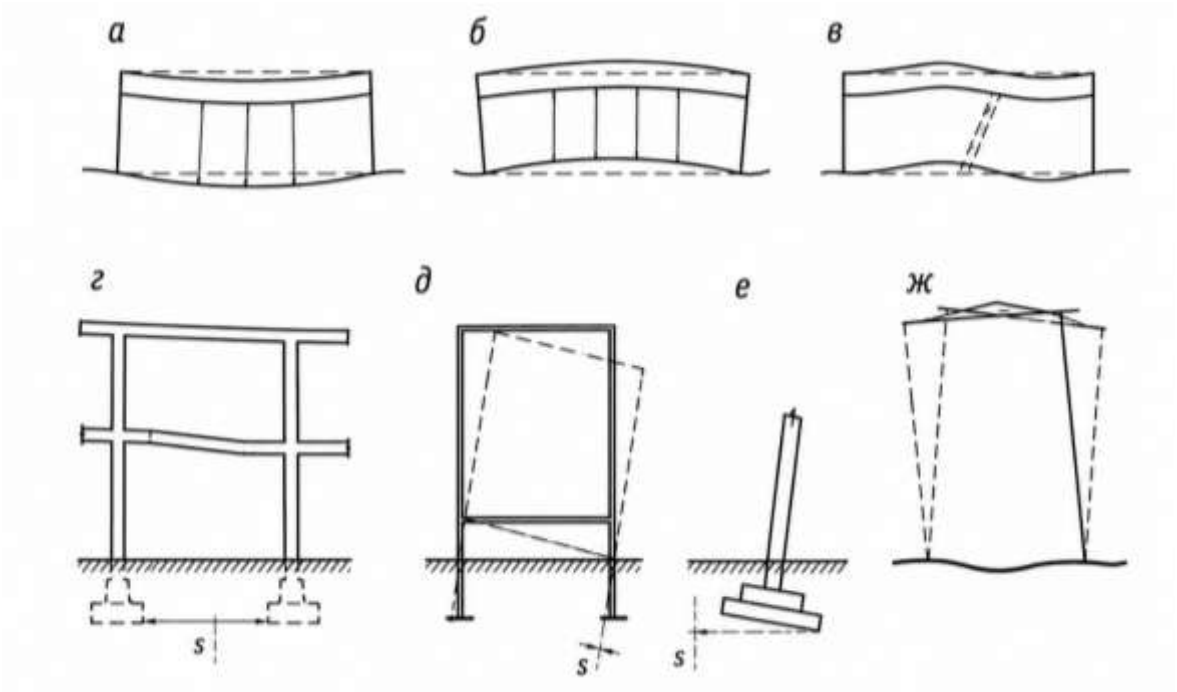


Рисунок 1 – Формы деформации зданий и сооружений при неравномерных осадках фундаментов: а – прогиб; б – выгиб (перегиб); в – перекос стен; г – перекос каркаса; д – крен сооружения; е – крен фундамента; ж – скручивание здания

Неравномерные осадки особенно опасны, так как вызывают дополнительные внутренние усилия в элементах здания. Именно они чаще всего приводят к появлению трещин, перекосов и локальных повреждений, даже при соблюдении условий прочности.

3. Фундаменты мелкого заложения

Для фундаментов мелкого заложения нагрузка передается на грунт через подошву, и их работа во многом определяется величиной и характером давления на основание. Несущая способность в этом случае определяется условием, при котором давление под подошвой не превышает расчетного сопротивления грунта.

Распределение давления зависит от схемы нагружения. При центральной нагрузке давление считается равномерным, что является наиболее благоприятным случаем. При внецентренной нагрузке возникает неравномерное распределение напряжений, при котором максимальные значения давления смещаются к краю подошвы.

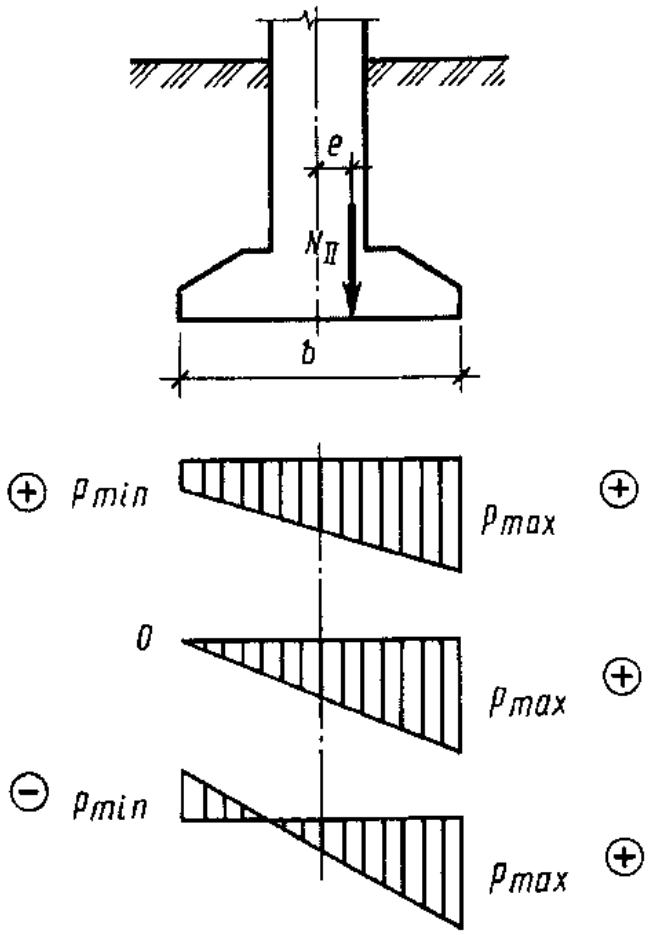


Рисунок 2 – Эпюры давлений под подошвой фундамента при действии внецентренной нагрузки

Если нагрузка слишком велика или эксцентриситет значительный, возможен частичный отрыв подошвы фундамента от грунта. Такое состояние недопустимо, так как приводит к резкому снижению устойчивости и увеличению деформаций.

4. Свайные фундаменты

При недостаточной несущей способности грунтов основания применяются свайные фундаменты, позволяющие передать нагрузку на более плотные слои. Их работа основана на сочетании сопротивления грунта под острием сваи и сил трения по ее боковой поверхности.

В зависимости от характера работы различают сваи-стойки, передающие нагрузку преимущественно через нижний конец, и висячие сваи, у которых значительная часть нагрузки воспринимается боковым трением. Такое различие важно учитывать при выборе расчетной схемы.

Интересный момент связан с работой свай в группе. При небольших расстояниях между сваями происходит взаимодействие напряжений в грунте, что приводит к изменению общей несущей способности. Этот эффект, называемый «кустовым», может как снижать, так и увеличивать эффективность работы свайного основания в зависимости от типа грунта.

5. Влияние технологии устройства

Метод устройства фундамента также оказывает влияние на его несущую способность, поскольку изменяет структуру и состояние грунта вокруг конструкции. Например, забивка свай сопровождается уплотнением грунта, что может повышать его сопротивление.

В то же время бурение практически не нарушает естественную структуру грунта, а вибропогружение временно снижает сопротивление за счет разжижения грунта, особенно в водонасыщенных песках.

Таким образом, одна и та же конструкция может работать по-разному в зависимости от применяемой технологии, что обязательно учитывается при проектировании и выборе метода устройства фундамента.

Обсуждение результатов

Если смотреть на все вместе, становится понятно, что несущая способность – это не просто характеристика грунта или фундамента отдельно. Это результат их совместной работы.

На практике часто оказывается, что расчет по прочности выполняется с запасом, а вот деформации выходят на первый план. Особенно это заметно в зданиях конечной жесткости, где даже небольшие неравномерные осадки вызывают дополнительные усилия.

Еще один момент – влияние геологических условий. Даже на одной площадке характеристики грунта могут сильно меняться по глубине и в плане. Поэтому расчеты всегда связаны с инженерными изысканиями.

Интересно, что в современных условиях все чаще используют численные методы (например, метод конечных элементов). Они позволяют учитывать сложное взаимодействие системы, но при этом требуют качественных исходных данных.

Также видно, что выбор типа фундамента – это компромисс:

- между надежностью и стоимостью;
- между простотой конструкции и условиями грунта;
- между расчетом и реальными условиями строительства.

Заключение

1. Несущая способность фундамента определяется совместной работой основания и конструкции, а не только характеристиками грунта.

2. Основными критериями оценки являются условия по несущей способности и по деформациям, причем в большинстве случаев именно деформации становятся определяющими.

3. Фундаменты мелкого заложения эффективны при достаточной прочности грунта, но чувствительны к неравномерным осадкам.

4. Свайные фундаменты позволяют передавать нагрузку на более прочные слои, однако их работа зависит от условий взаимодействия с грунтом и технологии устройства.

5. Геологические условия и характер нагрузок оказывают решающее влияние на выбор типа фундамента и расчетной схемы.

Список литературы:

1. Берлинов М. В. Основания и фундаменты: учебник для вузов. – 11-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2025. – 320 с. ISBN: 978-5-507-53298-8

2. Механика грунтов, основания и фундаменты : учебник для вузов / С. Б. Ухов, В. В. Семенов, В. В. Знаменский [и др.] ; под ред. С. Б. Ухова. – Москва: Изд-во АСВ, 1994. – 527 с. ISBN: 5-87829-003-0 EDN: SNSOZB

3. Рыжков И.Б., Кутлияров Д.Н., Архитектура, проектирование и организация культурных ландшафтов: учебное пособие для СПО – Санкт Петербург: Лань, 2021. – 204с. EDN: WRZEOI

4. Kutliyarov, D. N., Kutliyarov, A. N., Zagitova, L. R., & Kononova, A. Y. Geotechnical engineering surveys and soil testing in the construction of buildings and structures // Urban Construction and Architecture. – 2024. – Vol. 14, No. 3. – Pp. 77–84. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.03.09

5. Кутлияров Д.Н., Кутлияров А.Н. О моделировании природных систем / В сборнике: Научное обеспечение устойчивого развития АПК. материалы Всероссийской научно-практической конференции. – БГАУ, 2011. С. 45-49. EDN: RWHUVR

6. Сирбаева К.С., Кутлияров А.Н., Кутлияров Д.Н. Создание информационной модели территории при ведении комплексных кадастровых работ / В сборнике: Научные основы развития АПК. Сборник научных трудов по материалам XXI Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. – 2019. – С. 120-124. EDN: OHEKZT

УДК 624.131

Кузибаев Д. И.
Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

ИСПЫТАНИЯ АРМИРОВАННЫХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

Аннотация: Армированные грунтовые основания в последние годы все чаще применяются при строительстве зданий и сооружений на слабых и неоднородных грунтах. Их использование позволяет повысить несущую способность основания, уменьшить осадки и повысить общую устойчивость конструкции. В статье рассмотрены основные виды армирования грунтов, а также методы лабораторных и полевых испытаний, применяемые для оценки их работы под нагрузкой. Отдельное внимание уделено особенностям взаимодействия армирующих элементов с грунтовым массивом и анализу деформационного поведения основания. Приведен обзор наиболее распространенных схем испытаний, используемых в инженерной практике. Показано, что качество армирования и условия работы грунта напрямую влияют на эффективность основания.

Ключевые слова: армированный грунт, основание, испытания, осадка, деформации, несущая способность, геосинтетика.

Введение

При строительстве на слабых, просадочных и водонасыщенных грунтах часто возникают проблемы, связанные с недостаточной несущей способностью основания и значительными осадками. В таких условиях традиционные решения не всегда оказываются экономически целесообразными, поэтому широко применяются методы искусственного улучшения основания.

Одним из наиболее распространенных способов является армирование грунта. Смысл такого решения заключается в том, что в толщу грунта вводятся элементы, которые воспринимают растягивающие усилия и ограничивают развитие деформаций. За счет этого повышается устойчивость основания и уменьшается неравномерность осадок.

Особый интерес представляет вопрос испытаний таких оснований, поскольку именно результаты испытаний позволяют оценить реальную эффективность армирования и принять решение о возможности применения конструкции в проекте [1].

Цель статьи – рассмотреть основные методы испытаний армированных грунтовых оснований и проанализировать особенности их работы под нагрузкой.

Материалы и методы исследования

Для армирования грунтовых оснований в настоящее время применяются различные материалы: металлические сетки, георешетки, геотекстиль, геосетки, полимерные ленты и комбинированные армирующие прослойки.

Наиболее распространенными являются геосинтетические материалы, поскольку они обладают высокой прочностью на растяжение, устойчивостью к воздействию влаги и химической среды, а также удобны при монтаже.

Испытания армированных оснований можно условно разделить на две группы:

- лабораторные;
- полевые.

1. Лабораторные испытания

Лабораторные испытания позволяют изучить поведение армированного грунта в контролируемых условиях.

Чаще всего применяются:

- компрессионные испытания;
- испытания на сдвиг;
- штамповые испытания моделей основания;
- испытания на циклическое нагружение.

При компрессионных испытаниях определяется сжимаемость армированного слоя и его деформационные характеристики [2].

При испытаниях на сдвиг оценивается сопротивление грунта разрушению по плоскости сдвига. Это важно, поскольку армирующие элементы в значительной степени влияют именно на сопротивление сдвигу.

2. Полевые испытания

Полевые методы ближе к реальным условиям эксплуатации.

Наиболее часто используются:

- штамповые испытания;
- испытания статической нагрузкой;
- зондирование;
- наблюдение за осадками.

Испытания статической нагрузкой являются одними из наиболее информативных методов, поскольку позволяют получить зависимость осадки основания от приложенной нагрузки

В процессе испытания нагрузка прикладывается ступенями, а осадка фиксируется после стабилизации деформаций.

На рисунке 1 представлена схема испытания грунтового основания методом статического штампа.

Рисунок 1 ─ Схема полевых штамповых испытаний грунтового основания под статической нагрузкой

Результаты исследования

По результатам анализа литературных и учебных источников можно отметить, что армирование основания значительно влияет на характер распределения напряжений в грунтовом массиве.

Во-первых, уменьшаются вертикальные осадки.

Во-вторых, снижается вероятность развития локальных зон разрушения.

В таблице 1 представлены основные эффекты, достигаемые при армировании.

Таблица 1 ─ Влияние армирования на свойства грунтового основания

Показатель	Без армирования	С армированием
Осадка	высокая	пониженная
Устойчивость	средняя	повышенная
Сопротивление сдвигу	низкое	повышенное
Равномерность деформаций	низкая	высокая

Из анализа видно, что армирование особенно эффективно при работе основания на слабых глинистых и водонасыщенных грунтах.

Основные варианты применения армирования в грунтовых основаниях и ограждающих конструкциях представлены на рисунке 2.

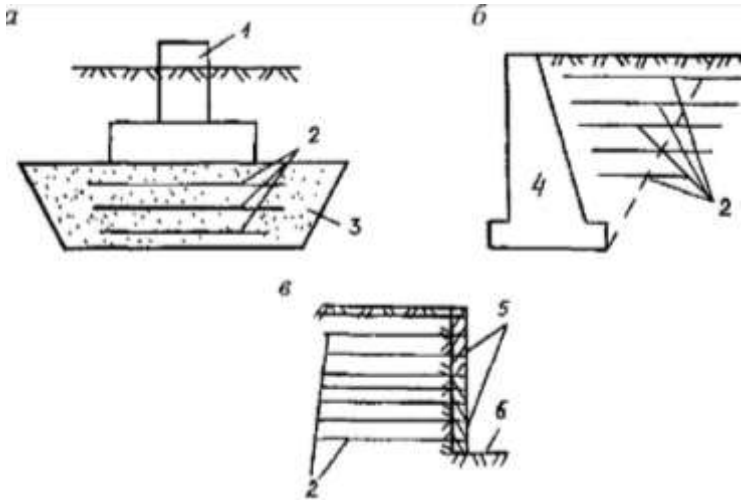


Рисунок 2 ─ а ─ в искусственном основании; б ─ в засыпке у подпорной стенки; в ─ в стене котлована; 1 ─ фундамент; 2 ─ армирующие элементы; 3 ─ песчаная подушка; 4 ─ подпорная стенка; 5 ─ сборная облицовка; 6 ─ дно котлована

Обсуждение результатов

Полученные данные показывают, что эффективность армирования зависит не только от типа используемого материала, но и от глубины его размещения.

Если армирующая прослойка расположена слишком высоко, часть нагрузки все равно передается на слабый слой грунта.

Если слишком глубоко ─ снижается ее влияние на перераспределение напряжений.

Также важную роль играет сцепление армирующего материала с грунтом.

Именно за счет совместной работы основания и армирующего элемента удается уменьшить деформации и повысить несущую способность.

По сути, армирующая прослойка работает как элемент, ограничивающий развитие растягивающих и сдвиговых деформаций в массиве.

Это особенно важно при строительстве на структурно-неустойчивых грунтах, где наблюдается повышенная сжимаемость

Заключение

В ходе рассмотрения методов испытаний армированных грунтовых оснований были выделены основные способы оценки их работы.

Лабораторные испытания позволяют определить деформационные и прочностные характеристики армированного слоя.

Полевые испытания дают возможность оценить работу основания в условиях, близких к реальным.

Использование армирования позволяет уменьшить осадки, повысить устойчивость и обеспечить более равномерное распределение нагрузки.

Такие основания особенно эффективны при строительстве на слабых и неоднородных грунтах.

Список литературы:

1. Берлинов М. В. Основания и фундаменты: учебник для вузов. – 11-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2025. – 320 с. ISBN 978-5-507-53298-8

2. Механика грунтов, основания и фундаменты : учебник для вузов / С. Б. Ухов, В. В. Семенов, В. В. Знаменский [и др.] ; под ред. С. Б. Ухова. – Москва: Изд-во АСВ, 1994. – 527 с. ISBN: 5-87829-003-0 EDN: SNSOZB

3. Рыжков И.Б., Кутлияров Д.Н., Кутлияров А.Н. Архитектура, проектирование и организация культурных ландшафтов: учебное пособие для СПО – Санкт Петербург: Лань, 2021. – 204с.

4. Kutliyarov, D. N., Kutliyarov, A. N., Zagitova, L. R., & Kononova, A. Y. Geotechnical engineering surveys and soil testing in the construction of buildings and structures // Urban Construction and Architecture. – 2024. – Vol. 14, No. 3. – Pp. 77–84. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.03.09

5. Сирбаева К.С., Кутлияров А.Н., Кутлияров Д.Н. Создание информационной модели территории при ведении комплексных кадастровых работ / В сборнике: Научные основы развития АПК. Сборник научных трудов по материалам XXI Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. – 2019. – С. 120-124. EDN: OHEKZT

6. Кутлияров Д.Н., Кутлияров А.Н. О моделировании природных систем / В сборнике: Научное обеспечение устойчивого развития АПК. материалы Всероссийской научно-практической конференции. – БГАУ, 2011. – С. 45-49. EDN: RWHUVR

УДК 624.15

Кузибаев Д. И.
Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАДОК ФУНДАМЕНТОВ НА КОМБИНИРОВАННО АРМИРОВАННОМ ОСНОВАНИИ

Аннотация. Рассматриваются особенности формирования осадок фундаментов на комбинированно армированных основаниях. Показано, как совместная работа грунта и армирующих элементов влияет на деформируемость системы. Обобщены подходы к оценке осадок с учетом изменения напряженного состояния основания. Отдельно разобраны механизмы перераспределения нагрузок в армированном грунтовом массиве. Проведен сравнительный анализ поведения обычного и армированного основания. Отмечены факторы, определяющие эффективность армирования. Работа носит обзорный характер и систематизирует основные положения, используемые при расчете осадок.
Ключевые слова: осадка, фундамент, армированное основание, грунт, деформации, геосинтетика, напряжения.

Введение

Осадки фундаментов – одна из тех вещей, которые вроде бы закладываются на этапе расчета, но на практике часто ведут себя иначе. Особенно это заметно на слабых грунтах, где даже при выполнении условий прочности возникают значительные деформации.

Один из способов снизить осадки – использовать армирование основания. Речь идет не о самом фундаменте, а именно о грунте, в который вводятся армирующие элементы. В результате получается комбинированная система, где нагрузка перераспределяется иначе, чем в обычном основании.

Проблема в том, что такая система работает сложнее. Грунт уже не ведет себя как однородная среда, а расчет становится менее очевидным. При этом классические методы не всегда напрямую применимы.

Цель – рассмотреть, как формируются осадки в комбинированно армированных основаниях и какие факторы на них влияют.

Задачи:

- разобрать механизм работы армированного основания;
- проанализировать влияние армирования на осадки;
- сравнить поведение обычного и армированного основания;
- обобщить подходы к расчету.

Материалы и методы исследования

Основание рассматривается как система, состоящая из грунта и армирующих элементов, работающих совместно. В расчетах используется

подход по предельным состояниям, при котором оцениваются как несущая способность, так и деформации [1].

Осадка фундамента в общем виде определяется как сумма деформаций слоев грунта:

$$s = \sum \frac{\sigma_i \cdot h_i}{E_i}$$

где σ_i – дополнительное напряжение в слое, h_i – его толщина, E_i – модуль деформации.

В армированном основании ситуация меняется. Армирующие элементы воспринимают часть нагрузки и ограничивают деформации, поэтому эффективный модуль деформации системы увеличивается.

Это можно учесть введением приведенного модуля:

$$E_{\text{пр}} = E_{\text{гр}} \cdot k$$

где k – коэффициент, учитывающий влияние армирования.

Также учитывается перераспределение напряжений. В неармированном основании давление передается по классической схеме, а в армированном – часть напряжений уходит в армирующие элементы, что снижает нагрузку на грунт.

Для анализа используется метод послойного суммирования с учетом изменения напряжений и жесткости основания. Такой подход позволяет оценить влияние армирования без детализированных численных моделей [2].

Результаты исследования

1. Формирование осадок в обычном основании

В неармированном основании осадка формируется за счет сжатия грунта под действием нагрузки. Давление распространяется вглубь, постепенно уменьшаясь, но при слабых грунтах зона влияния может быть значительной.

На рисунке 1 показана схема распределения напряжений и формирования осадок.

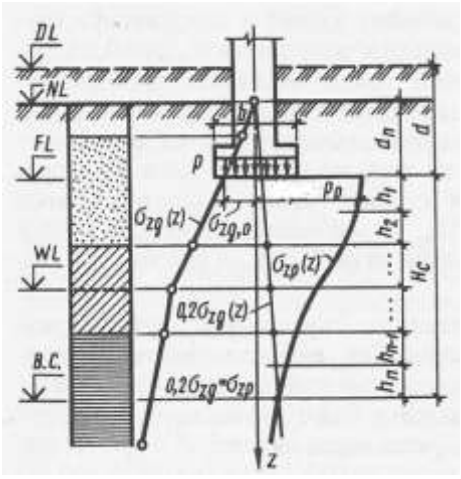


Рисунок 1 – Расчетная схема для метода послойного суммирования

Осадка зависит от модуля деформации грунта и толщины сжимаемой толщи. Чем слабее грунт, тем больше деформация при той же нагрузке.

2. Изменение работы основания при армировании

При введении армирующих элементов структура основания меняется. Грунт и армирование начинают работать совместно, ограничивая развитие деформаций.

Часть нагрузки воспринимается армирующими элементами, что снижает напряжения в грунте. В результате уменьшается не только общая осадка, но и ее неравномерность.

Это особенно заметно в верхних слоях основания, где деформации обычно максимальны. Армирование фактически «сдерживает» развитие осадки.

3. Перераспределение напряжений

В армированном основании напряжения распределяются иначе. Если в обычном случае эпюра давления плавно убывает с глубиной, то при армировании часть нагрузки перераспределяется в плоскости армирования.

Это приводит к уменьшению вертикальных напряжений в грунте и снижению деформаций.

4. Влияние параметров армирования

Эффективность армирования зависит от ряда факторов:

- жесткости армирующего материала;
- глубины его заложения;
- расстояния между элементами.

При недостаточной жесткости эффект будет слабым. Если армирование расположено слишком глубоко, оно почти не влияет на осадки.

Таким образом, важно не просто наличие армирования, а его правильное расположение и параметры.

5. Сравнение осадок

Сравнение показывает, что армирование позволяет снизить осадки, особенно на слабых основаниях.

Разница становится заметной при увеличении нагрузки. В неармированном основании осадка растет быстрее, тогда как армированное основание работает более устойчиво.

Сравнение поведения оснований без армирования и с применением армирующих элементов приведено в таблице 1. Видно, что основное отличие связано с перераспределением напряжений и изменением характера деформаций. Армирование позволяет снизить как абсолютные значения осадок, так и их неравномерность, что особенно важно при работе на слабых грунтах.

Таблица 1 – Сравнение работы неармированного и армированного основания

Показатель	Неармированное основание	Армированное основание
Характер распределения напряжений	Вертикальное распространение с глубиной	Частичное перераспределение в армирующем слое
Величина осадки	Значительная, особенно на слабых грунтах	Сниженная за счет повышения жесткости
Неравномерность осадок	Часто выражена	Снижается
Работа грунта	Самостоятельное восприятие нагрузки	Совместная работа с армированием
Влияние нагрузки	Быстрое увеличение осадок	Более плавное развитие деформаций
Эффективность на слабых грунтах	Низкая	Высокая

Обсуждение результатов

Если собрать все вместе, становится понятно, что армирование влияет не столько на прочность, сколько на деформируемость основания.

Основной эффект связан с перераспределением напряжений и увеличением жесткости системы. За счет этого уменьшаются осадки и выравнивается их распределение.

Но важно учитывать, что эффект не универсален. В плотных грунтах он может быть почти незаметен, а в слабых – наоборот, критически важен.

Также видно, что расчет таких оснований сложнее. Простые формулы дают только приближенную оценку, а для точного анализа часто требуются численные методы.

Заключение

1. Осадки фундаментов определяются деформируемостью основания и зависят от характеристик грунта и нагрузки.
2. Комбинированное армирование изменяет работу основания за счет перераспределения напряжений и повышения его жесткости.
3. Применение армирования позволяет снизить величину осадок и уменьшить их неравномерность.
4. Эффективность армирования зависит от его параметров и условий грунта, что требует обоснованного выбора конструктивного решения.
5. Для оценки осадок армированных оснований применяются модифицированные методы расчета, учитывающие совместную работу грунта и армирующих элементов.

Список литературы:

1. Берлинов М. В. Основания и фундаменты: учебник для вузов. – 11-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2025. – 320 с. ISBN 978-5-507-53298-8

2. Механика грунтов, основания и фундаменты : учебник для вузов / С. Б. Ухов, В. В. Семенов, В. В. Знаменский [и др.] ; под ред. С. Б. Ухова. – Москва: Изд-во АСВ, 1994. – 527 с. ISBN: 5-87829-003-0 EDN: SNSOZB

3. Рыжков И. Б., Кутлияров Д. Н., Кутлияров А. Н. Архитектура, проектирование и организация культурных ландшафтов: учебное пособие для СПО. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 204 с. EDN: WRZEOI

4. Кутлияров Д. Н., Кутлияров А. Н., Загитова Л. Р., Кононова А. Ю. Инженерно-геотехнические изыскания и испытания грунтов при строительстве зданий и сооружений // Градостроительство и архитектура. – 2024. – Т. 14, № 3.

5. Кутлияров Д.Н., Кутлияров А.Н. О моделировании природных систем / В сборнике: Научное обеспечение устойчивого развития АПК, материалы Всероссийской научно-практической конференции, БГАУ. – 2011. – С. 45-49. EDN: RWHUVR

6. Сирбаева К.С., Кутлияров А.Н., Кутлияров Д.Н. Создание информационной модели территории при ведении комплексных кадастровых работ / В сборнике: Научные основы развития АПК. Сборник научных трудов по материалам XXI Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. – 2019. – С. 120-124. EDN: OHEKZT

УДК 004.7(674.5)

Анаджиб Араби Адум
Научный руководитель: Мокрова Н. В., д.т.н., профессор
Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

ЦИФРОВИЗАЦИЯ В ЧАДЕ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Аннотация. Статья посвящена анализу процессов цифровизации в Республике Чад. Автор рассматривает текущее состояние телекоммуникационной инфраструктуры, уровень доступа населения к интернету и мобильной связи, а также ключевые барьеры, сдерживающие цифровое развитие страны. Особое внимание уделяется географическим, экономическим и инфраструктурным особенностям Чада как внутриконтинентального государства. В работе представлены статистические данные по абонентам мобильной связи за 2015–2023 гг., картографический материал и анализ зарубежного опыта (Европа, США, Россия). На основе международных практик и технических решений (включая WACS, Wi-Fi mesh, FTTH, спутниковую связь) автором предлагаются меры по расширению доступа к цифровым услугам, повышению надёжности сетей и снижению стоимости подключения. В заключении формулируются рекомендации по развитию регионального сотрудничества, привлечению инвестиций и внедрению адаптированных технологий для сельских районов.

Ключевые слова: Цифровизация, Чад, телекоммуникации, интернет-доступ, мобильная связь, цифровая инфраструктура, WACS, волоконно-оптические линии связи, спутниковая связь, Wi-Fi mesh, сельские зоны, энергоснабжение, региональная интеграция, точки обмена трафиком (IXP), инвестиции, цифровое неравенство.

1. Введение

Во взаимосвязанном мире цифровизация получила преимущество во всех областях и имеет важное значение для развития стран. Она трансформирует традиционные отрасли, создает новые возможности, улучшает доступ к услугам и способствует повышению качества жизни населения [14].

Цифровизация может стать важным инструментом стимулирования роста в других секторах, таких как сельское хозяйство, образование, здравоохранение, безопасность и финансовые услуги. Например, внедрение цифровых технологий в сельском хозяйстве может повысить производительность и улучшить доступ к рынкам, в то время как цифровые платформы в образовании и здравоохранении могут расширить доступ к качественным услугам для населения, особенно в отдаленных районах (см. эту статью [9]). Кроме того, в секторе безопасности цифровые инструменты позволяют агентам обнаруживать и предотвращать опасность.

Литература выявляет значительный пробел в технологических инновациях, таких как приложения или программное обеспечение, что

представляет собой большую возможность для развития и благополучия населения. В Чаде доступ к интернету остается относительно ограниченным. Хотя использование мобильных телефонов в этом секторе выросло, этот рост открывает новые перспективы для внедрения цифровых решений.

Операторы используют сети FTTH (оптоволокно, интернет, связь, телекоммуникации), которые могут предложить пользователям множество преимуществ по сравнению с традиционными широкополосными сетями. Некоторые из этих сетей обеспечивают более высокую скорость загрузки и выгрузки данных, а также более стабильное соединение. Согласно литературным данным, в Чаде стоимость подключения к интернету составляет 16,20 евроцентов, что делает его одной из стран с очень высокими ценами на интернет-соединение с точки зрения покупательной способности граждан Чада. Кроме того, доступ к интернету в некоторых регионах недоступен [14].

Сектор часто сталкивается с проблемами из-за недостаточной цифровой инфраструктуры, а конкуренция между операторами относительно слаба из-за недостатка инвестиций как со стороны местных, так и международных источников. Однако правительство Чада при поддержке международных организаций начинает реализовывать инициативы, направленные на развитие цифровой инфраструктуры страны. Таким образом, цифровизация в Чаде сталкивается со значительными проблемами, а именно с недостатком инвестиций в цифровую инфраструктуру и подготовкой специалистов.

Основная цель данной статьи – оценить текущий уровень цифровизации в Чаде, определить основные проблемы развития интернет-сетей и предложить меры по ускорению этого процесса.

Предложенная в данной статье методология основана на аналитическом и диагностическом подходе, структурированном в три этапа, соответствующих поставленным целям.

Ключевые моменты данной обзорной статьи следующие:

1 оценка уровня цифровизации – анализ текущего состояния связи и интернет-инфраструктуры в Чаде;

2 выявление основных проблем – перечень главных препятствий, мешающих развитию интернет-сетей в стране;

3 предложение мер по ускорению – разработка конкретных решений для ускорения процесса цифровизации Чада.

Географическое положение Чада

Географически Чад расположен в самом сердце Африки и занимает площадь 1,2 миллиона км² с населением 17 миллионов человек. Чад – страна, не имеющая выхода к морю, окруженная шестью соседними странами: Суданом на востоке, Ливией на севере, Нигером и Нигерией на западе, а также Камеруном и Центральноафриканской Республикой на юге. Климат – тропическая пустыня на севере и экваториальный муссонный на юге.

На этой карте показаны регионы с ограниченным доступом к интернету и энергоснабжению, в частности, на севере страны, а именно: Бардай, Зуар, Файя-Ларджо и Фада. Карта Чада, предоставленная [5], позволяет нам увидеть регионы с доступом к интернету и регионы с ограниченным доступом.

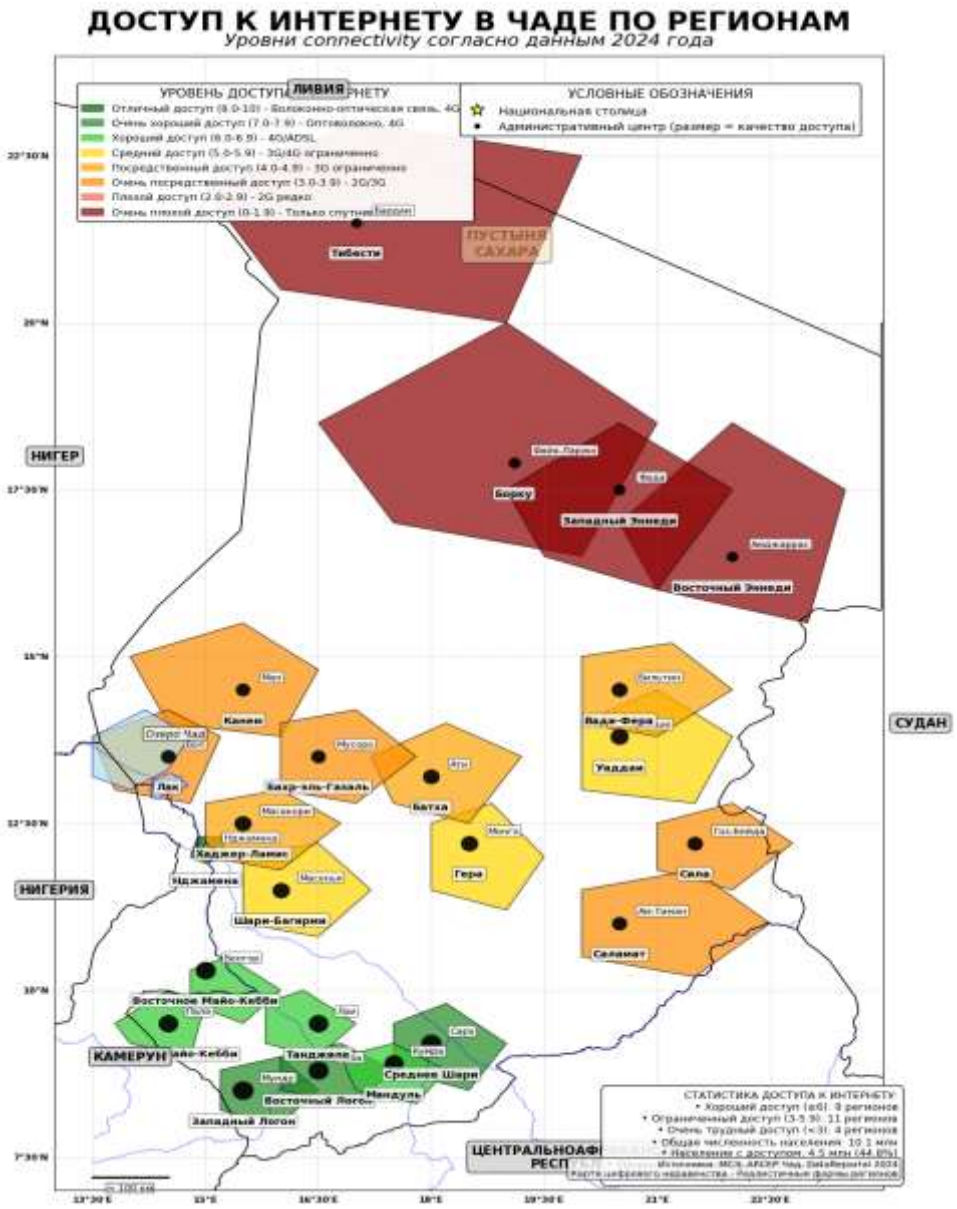


Рисунок 1 – Карта Чад

В центральной и южной частях страны есть регионы с относительно хорошим доступом в интернет, такие как города Нджамена, Мунду и Сарх. На западе оптоволоконные кабели через Нигер увеличивают пропускную способность интернета, а на востоке оптоволоконные кабели через Судан обеспечивают аналогичное покрытие [1].

Основными водными путями являются реки Чари и Логоне, озеро Чад и многочисленные другие реки, которые разливаются во время сезона дождей и почти полностью пересыхают в сухой сезон. Зимние температуры обычно не опускаются ниже 15°C, а летние обычно не превышают 35°C. Среднегодовое количество осадков на севере обычно колеблется от 100 до 24 мм, в то время как на юге оно может достигать 1000 мм в год, причем большая часть осадков выпадает в сезон дождей.

В стране развиваются образование (школы, колледжи и университеты), медицина (медицинские учреждения строятся) и военное дело. Телекоммуникации и информационные технологии относительно слабо развиты; издается несколько газет, вещают несколько телеканалов, а общее число интернет-пользователей в 2009 году составило 170 000 [8].

Системы сотовой и телефонной связи относительно хорошо развиты. Согласно данным. Эти данные приведены в [17]. С 2015 по 2023 год в Республике Чад действовали три оператора мобильной связи: Celtel Chad, Tigo и Salam, и два оператора фиксированной связи: Sotel Ta Wali и FAI. Общее число абонентов в 2015–2025 годах показано в Таблице 1.

Таблица 1 – Системы сотовой и телефонной связи

Год	Airtel(ранее Celtel / Zain)	Тиго(который впоследствии стал Тиго) Моов Африка)	Салам(который стал Салам) СудаЧад)
2015	3 500 000	2 800 000	150 000
2016	3 800 000	3 000 000	200 000
2017	4 100 000	3 200 000	250 000
2018	4 400 000	3 400 000	300 000
2019	4 700 000	3 600 000	350 000
2020	5 000 000	3 800 000	400 000

Airtel был ведущим оператором мобильной связи в Чаде на протяжении всего периода 2015-2023 годов.

Tigo (Moov Africa) оставался на втором месте, но темпы его роста замедлились после 2022 года.

Salam (SudaChad) имел значительно меньшую абонентскую базу, но стабильно рос.

Рост числа абонентов (2015-2023)

Airtel: увеличилось с 3,5 млн до 5,9 млн (+2,4 млн, или +68% за 8 лет).

Tigo: увеличилось с 2,8 млн до 4,33 млн (+1,55 млн, или -55%).

Salam: увеличилось со 150 000 до 550 000 (+400 000, или -267%), что является очень сильным относительным ростом, учитывая небольшую клиентскую базу.

Проблемы

Несмотря на эти достижения, остаются и некоторые препятствия. В некоторых регионах цифровая инфраструктура остается недостаточной, что делает доступ к интернету неравным. Кроме того, осведомленность и обучение использованию технологий все еще ограничены, что препятствует их широкому внедрению. Вопросы кибербезопасности и защиты персональных данных также вызывают серьезную озабоченность. Поскольку все больше и больше жителей Чада подключаются к интернету, крайне важно разработать правила, гарантирующие безопасность пользователей.

Однако цифровая инфраструктура в Чаде сталкивается со значительными проблемами. Большая часть населения не имеет доступа к высокоскоростному интернету, а мобильная связь в основном доступна в крупных городах, таких как Нджамена, Мунду, Абеше и Сарх. В сельских районах, где проживает большинство населения, доступ остается ограниченным. Одна из главных проблем заключается в недостаточно развитой энергетической системе [18].

Ненадежное электроснабжение в некоторых регионах представляет собой серьезное препятствие для внедрения цифровых технологий. Например, частые отключения электроэнергии, даже в городах, затрудняют использование цифрового оборудования и инфраструктуры. Кроме того, отсутствие развитых волоконно-оптических сетей в Чаде ограничивает проникновение интернета. Большая часть интернет-трафика в стране передается через спутники, что является дорогостоящим и медленным решением. График ниже иллюстрирует проблему доступа к интернету в Чаде.

Рисунок 2 – Проблемы с доступом в интернет в Чаде

В Чаде доступ к цифровым услугам остается очень низким. По данным Всемирного банка, доступ к интернету имеют только 21% населения, а проникновение мобильной связи не превышает 45%. Эта ситуация значительно ограничивает интеграцию цифровых технологий в повседневную жизнь и экономику. Цифровые услуги, такие как мобильный банкинг, электронная коммерция и мобильные государственные услуги, которые могли бы стать важным инструментом расширения доступа к финансовым услугам, доступны лишь небольшой части населения [14].

Модель построения информационного общества

Упомянутые выше экономические изменения, в частности общая тенденция к интеграции в информационное общество, характерны для всех стран мира. Эта позиция закреплена в Окинавской хартии [16] о глобальном информационном обществе. Анализ моделей построения информационного общества в разных странах в целом выявляет несколько ключевых факторов, включая: макроэкономическую политику; специфику законодательства, способствующего этому переходу; и национальные культурные и ментальные особенности, определяющие развитие информационного общества.

Африканская модель: Ключевой характеристикой этой модели является отношение африканских лидеров к ИКТ-системам. По мнению автора,

ключевой характеристикой этой модели является отношение африканских лидеров к ИКТ-системам. Как и в латиноамериканской модели, макроэкономическая политика африканских государств в отношении ИКТ основана на двух различных принципах. С одной стороны, этот экономический сектор подвергается строгому государственному регулированию. С другой стороны, этот сегмент переживает масштабную либерализацию под давлением ведущих мировых производителей этих технологий [17] (Автор) указывает, что, в отличие от европейской модели, африканские государства даже не пытаются найти баланс между государственным регулированием и рыночными отношениями. Это отражает неприятие национальных интересов в политике информационного общества. Стоит отметить, что развитие информационного общества в Африке неравномерно, со значительными различиями в экономическом развитии между странами континента. Лишь немногие африканские страны готовы интегрироваться в глобальное информационно-коммуникационное пространство.

Анализ технических решений в области телекоммуникаций

Мы анализируем существующие методы и решения для построения систем связи, используемых в Европе, России, США и других странах с развитой телекоммуникационной инфраструктурой. Согласно [9], телекоммуникационная система состоит из подсистемы оборудования, подсистемы доступа, подсистемы управления и подсистемы транспортной сети. Подсистема абонентского оборудования обеспечивает прямой доступ к телекоммуникационной сети для приема коммуникационных услуг. Она может включать персональные компьютеры, стационарные телефоны, различные мобильные устройства, устройства хранения данных (серверы), телеметрические датчики, системы видеонаблюдения и другое оборудование, предназначенное для сбора, хранения и воспроизведения информации.

Подсистема доступа обеспечивает подключение абонентского оборудования к телекоммуникационной системе. В качестве подсистем доступа могут выступать коммутаторы Ethernet, точки доступа Wi-Fi и базовые станции сетей GSM, UMTS (Универсальная система мобильной связи), WiMAX и LTE (LTE Evolution). Подсистема управления отвечает за распределение информационных потоков внутри сети, обеспечение надежной передачи, управление услугами и другие процессы, связанные с маршрутизацией информации от отправителя к получателю. Она является центральным элементом телекоммуникаций, состоящим из множества программных и аппаратных компонентов, обеспечивающих установление соединения и требуемое качество передаваемой информации в соответствии с источниками [9]. В современных системах передачи информации решающую роль в управлении играют протоколы – алгоритмические правила,

управляющие функциями операционной системы различного сетевого оборудования (маршрутизаторов, коммутаторов, точек доступа, базовых станций и т. д.). Разумный выбор протоколов определяет такие параметры, как безопасность и производительность системы связи, что существенно влияет на рентабельность всего проекта развертывания сети.

Транспортная подсистема обеспечивает взаимодействие между подсистемами доступа и управления. Транспортная сеть организуется с использованием волоконно-оптических линий связи и радиорелей, беспроводных точек доступа на основе оборудования Wi-Fi или WiMAX, а также лазерных систем передачи данных. Этот тип оборудования уникален тем, что был разработан в первую очередь для Европы, США, Японии, России и других стран, где на момент его внедрения уже существовали развитые электрические и коммуникационные сети. Большое количество малообеспеченных жителей также является ограничивающим фактором, первоначально ограничивающим доступность дорогостоящих технологий, требуемое качество передаваемой информации в соответствии с источниками [9].

Анализ мирового опыта развертывания сетей доступа показывает, что создание проводных сетей доступа обходится в 3-5 раз дороже, чем создание беспроводных сетей. Помимо ограничений проводных решений доступа, важно также учитывать сложность реконфигурации сети, растущее число абонентских устройств и постепенное увеличение количества абонентских подключений на единицу оборудования в подсистеме доступа. Например, проводной Ethernet-маршрутизатор стоимостью менее 30 долларов может подключить от 4 до 5 устройств, в то время как Wi-Fi-маршрутизатор может поддерживать до 50 [14].

Создание магистральной сети также имеет решающее значение. Опыт развертывания сетей в сельских районах Восточной Европы, Юго-Восточной Азии и Индии показывает, что технология mesh является наиболее эффективной. Меш-сети – это телекоммуникационные системы, организованные в виде сетки [17, 18]. Оборудование меш-сетей обычно работает в соответствии со стандартами IEEE 802.11a/b/c/n/s (Wi-Fi) или IEEE 802.16 (WiMAX). Следует отметить, что сети Wi-Fi более распространены. Пример меш-сети показан на рисунке 1 [14].

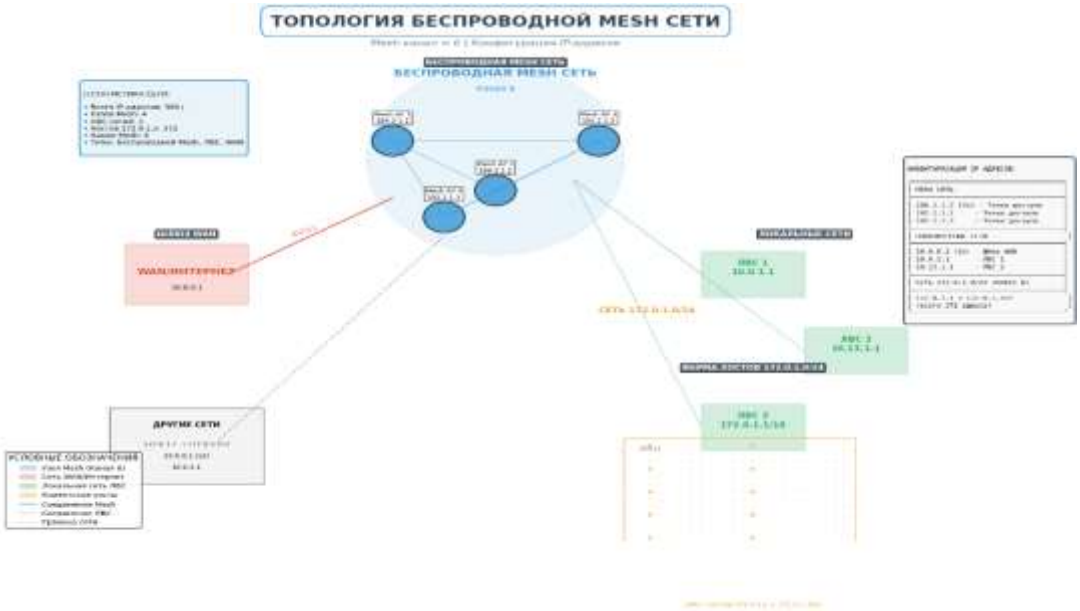


Рисунок 3 – Пример топологии Mesh-сети

Основные преимущества ячеистой технологии заключаются в простоте установки оборудования, низкой стоимости точек доступа (наружные точки доступа редко стоят больше 250-300 долларов), возможности модификации топологии сети и отсутствии необходимости в дополнительной настройке после установки (специальные протоколы автоматически идентифицируют аналогичное оборудование и рассчитывают необходимые маршруты передачи данных).

Использование сетей на основе технологий GSM, UMTS и LTE может оказаться экономически нецелесообразным из-за их высокой стоимости, сложности планирования сети и необходимости привлечения большого количества высококвалифицированных специалистов во время строительства.

Важным аспектом проектирования и модернизации сети является прогнозирование общей нагрузки трафика и диапазона приложений, запрашиваемых пользователями. Опыт показывает, что наиболее популярными сервисами при доступе к интернету являются потоковое видео, доступ к различным порталам обмена информацией (особенно социальным сетям) и игровые серверы. Согласно прогнозным оценкам спроса на трафик приложений [14, 9, 10], ключевыми параметрами являются такие характеристики, как вероятность потери пакетов и джиттер пакетов.

Как уже упоминалось, одной из проблем развития электросетей в Республике Чад является недостаточное электроснабжение оборудования из-за слаборазвитой электросети. Для преодоления этого ограничения можно использовать системы, основанные на альтернативных источниках энергии (солнечные панели и ветряные турбины).

Стратегия улучшения, ориентированная на устойчивость и открытость

Первоочередной задачей является диверсификация международных маршрутов доступа. Чад стремится установить новые межсетевые соединения с несколькими прибрежными странами, имеющими точки подключения подводных кабелей, такими как Камерун, Судан и Нигер, а также, в среднесрочной перспективе, с Ливией и Нигерией. Системы, такие как SAT3, WACS и Main One, призваны снизить зависимость от одного транзитного маршрута и обеспечить резервирование сети. Параллельно страна фокусируется на развертывании точек обмена интернет-трафиком (IXP) в нескольких стратегических городах, таких как Нджамена, Абеш, Мао, Мунду и Сарх, как отмечено в [9]. Западноафриканская кабельная система (WACS) – это сеть подводных кабелей протяженностью 14 530 км, соединяющая 15 стран, начинающаяся в Южной Африке и заканчивающаяся в Лондоне. WACS состоит из четырех пар волокон. Первоначально он был разработан с 128 длинами волн на пару волокон, работая со скоростью 10 Гбит/с на длину волны, и первоначальной проектной пропускной способностью 5,12 Тбит/с. Первоначальные инвестиции в WACS составили приблизительно 650 миллионов долларов США. Эти данные предоставлены [9].

Рисунок 4 – WACS

Система WACS обеспечивает время кругового пути (RTD) в 138,5 мс между станцией связи Yzerfontein CLS в Южной Африке и станцией связи Highbridge CLS в Великобритании.

Эта инфраструктура позволит удерживать местный трафик внутри страны, тем самым снижая задержку и стоимость международных межсетевых соединений, а также способствуя развитию местного контента и услуг. Стратегия также включает интеграцию дополнительных технологий в труднодоступных районах. Использование таких решений, как Wi-Fi дальнего действия, радиосети «точка-точка» и недорогие спутники, расширит зону покрытия в сельских районах. Также рассматривается использование «белых зон» в телевизионном спектре для обеспечения более доступной связи в отдаленных регионах [9].

Наконец, успех этой цифровой трансформации зависит от укрепления регионального сотрудничества. Чад выступает за структурирование трансграничных проектов, постоянный диалог между государствами, операторами и донорами, а также за усиление координации регулирования на региональном уровне. Именно благодаря такому коллективному подходу Африка сможет построить суверенное, инклюзивное и устойчивое межсетевое соединение [9].

Заключение

Анализ процесса цифровизации Чада показывает, что страна находится в процессе цифровой трансформации, отмеченной многообещающими преимуществами, но также и значительными структурными проблемами. Основные выводы: - Рынок мобильной связи динамичен и постоянно растет, в нем доминируют два оператора (Airtel и Moov Africa/Tigo), на долю которых приходится примерно 95% абонентов.

Доступ к интернету остается крайне неравномерным, покрытие ограничено крупными городами, а уровень проникновения низкий (21% населения). Основными препятствиями являются высокая стоимость подключения, слабая конкуренция между операторами и недостаточные цифровые навыки.

Предложенные решения включают развитие региональных межсетевых соединений (подводные кабели WACS, местные коммутаторы - XP) для снижения зависимости от спутниковой связи. Приоритизация технологий, адаптированных для сельских районов (сетевые Wi-Fi, солнечные решения), для расширения покрытия с меньшими затратами. Укрепление регионального сотрудничества и государственных и частных инвестиций в инфраструктуру и обучение.

Списък литературы:

1. Карта Республики Чад [Электронный ресурс]. – URL: http://planetolog.ru/map-country.php?country=TD (дата обращения: 11.06.2026).

2. Barba A. Observatoire des marchés : état des lieux du secteur des télécommunications en République du Tchad / Antoine Barba. – Paris : Clarity Telecom, 2013.

3. Комашинский В. И. Системы подвижной радиосвязи с пакетной передачей информацией. Основы моделирования / В. И. Комашинский, А. В. Максимов. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 173, [1] с.

4. Вишневский В. М., Портной С., Шахнович И. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G / В. Вишневский, С. Портной, И. Шахнович. – Москва: Техносфера, 2010. – 470 с.

5. Zhang Y., Luo J., Hu H. Wireless mesh networking: architectures, protocols and standards. – New York: Taylor & Francis Group, 2007. – 592 p.

6. Интернет с аэростата: глобальный проект Google [Электронный ресурс]. – URL: https://zoom.cnews.ru/rnd/article/item/internet_s_aerostata_globalnyy_proekt_google (дата обращения: 11.06.2026).

7. Величко, В. В. Телекоммуникац. системы и сети. В 3 т. Т. 3. Мультисервисные сети: Уч. пос. / В.В. Величко и др.; Под ред. В.П. Шувалова. - 2-е изд.- Москва : Гор. линия-Телеком, 2015. - 592 с.: ил.; . - (Специальность). ISBN 978-5-9912-0484-2, 5000 экз. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/506022 (дата обращения: 12.05.2026). – Режим доступа: по подписке.

8. Вишневский В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / В. М. Вишневский; Рос. акад. наук, Ин-т проблем передачи информации. – Москва: Техносфера, 2003. – 506 с.

9. West Africa Cable System (WACS) [Электронный ресурс] // Submarine Networks. – URL: https://www.submarinenetworks.com/en/systems/euro-africa/wacs (дата обращения: 11.06.2026).

10. Connectivité au Tchad: entre vulnérabilité et ambitions de transformation numérique // Digital Business Africa [Электронный ресурс]. – URL: https://www.digitalbusiness.africa/connectivite-au-tchad-entre-vulnerabilite-et-ambitions-de-transformation-numerique/ (дата обращения: 11.06.2026).

11. Данные о телекоммуникациях в Чаде [Электронный ресурс] // Données Mondiales. – URL: https://www.donneesmondiales.com/afrique/tchad/telecommunication.php (дата обращения: 11.06.2026).

12. Autorité de Régulation des Communications Électroniques et des Postes (ARCEP) [Электронный ресурс]. – URL: https://arcep.td/rapports_annuels.html (дата обращения: 11.06.2026).

13. Абдулай М. С. Ю. Влияние цифровизации на экономику Республики Чад // Российский внешнеэкономический вестник. – 2025. – № 4. – С. 126–132. DOI: https://doi.org/10.24412/2072-8042-2025-4-126-132

14. Mesh-сети [Электронный ресурс] // Хабр. – URL: https://habr.com/ru/hubs/mesh_networking/articles/ (дата обращения: 11.06.2026).

15. Модели информационного общества [Электронный ресурс] // Studref. – URL: https://studref.com/328341/ekonomika/modeli_informatsionnogo_obschestva (дата обращения: 11.06.2026).

16. Салицкая Е. А. Научно-технологический комплекс КНР: опыт развития // Наука. Инновации. Образование. – 2013. – Т. 8, № 2. – С. 7–22. EDN: RSMYBR

17. Денисов В. В. Применение технологий анализа больших данных в сфере телекоммуникаций // Просвещение и познание. – 2021. – № 1 (1). – С. 12–22.

УДК 004.42:658.78

Полозков А. И.
Московский университет имени С. Ю. Витте, Москва, Россия

УПРАВЛЕНИЕ РАЗРАБОТКОЙ КОНФИГУРАЦИИ БИТ.ЦЕНТР УПРАВЛЕНИЯ ЛИЗИНГОМ НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ 1С:ПРЕДПРИЯТИЕ: МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ПРАКТИКА

Аннотация. В статье рассматриваются методологические подходы к управлению разработкой корпоративной конфигурации БИТ.Центр Управления Лизингом (ЦУЛ) на базе платформы 1С:Предприятие 8.3. Проведен сравнительный анализ методологий управления разработкой – каскадной (Waterfall), гибкой (Agile/Scrum) и итерационной (RUP), – применительно к специфике доработки отраслевых решений на платформе 1С. Обоснован выбор итерационно-инкрементальной модели в сочетании с элементами Scrum как наиболее эффективного подхода для данного класса проектов. Описан типовой жизненный цикл конфигурации, включающий управление требованиями, ветвлением, тестированием и релизным процессом. Результаты исследования могут быть использованы для повышения качества управления аналогичными проектами внедрения ERP-систем на предприятиях лизинговой отрасли.

Ключевые слова: 1С:Предприятие, БИТ.ЦУЛ, управление конфигурацией, Agile, Scrum, лизинговые информационные системы, разработка на 1С, жизненный цикл программного обеспечения.

Введение

Цифровая трансформация лизинговой отрасли предъявляет возрастающие требования к информационным системам, обеспечивающим автоматизацию ключевых бизнес-процессов: от формирования и сопровождения лизинговых договоров до управления портфелем активов и взаимодействия с регуляторными органами. В условиях конкурентного рынка лизинговые компании нуждаются в гибких, масштабируемых и отказоустойчивых платформах, способных оперативно адаптироваться к изменениям нормативной базы и рыночной конъюнктуры.

БИТ.Центр Управления Лизингом (далее – БИТ.ЦУЛ) представляет собой отраслевую конфигурацию для платформы 1С:Предприятие 8.3, разработанную компанией «Первый БИТ» и ориентированную на комплексную автоматизацию деятельности лизинговых компаний. Конфигурация включает функциональные блоки управления договорной деятельностью, финансовым учетом, работой с имуществом, а также отчетностью по МСФО и РСБУ. Вместе с тем успешность внедрения и эксплуатации подобного решения в значительной мере определяется не только

его функциональными возможностями, но и качеством процессов управления разработкой и сопровождением конфигурации.

Актуальность исследования обусловлена тем, что разработка конфигураций на платформе 1С обладает рядом специфических особенностей, существенно отличающих ее от классического программирования: тесная связь с типовым решением-прародителем, механизмы расширений и заимствований, особые инструменты версионирования (EDT, хранилище конфигурации), а также необходимость соблюдения технологических стандартов 1С при сохранении совместимости с обновлениями вендора. Это требует переосмысления классических методологий управления разработкой применительно к данной экосистеме.

Цель настоящей статьи – провести анализ применимости основных методологий управления разработкой программного обеспечения к проектам создания и сопровождения конфигурации БИТ.ЦУЛ и предложить обоснованную методологическую модель управления жизненным циклом такой конфигурации.

Теоретико-методологические основы управления разработкой ПО

В теории и практике управления разработкой программного обеспечения сложился ряд устойчивых методологических подходов. Наиболее распространенными являются каскадная модель (Waterfall), семейство гибких методологий (Agile) и рационально-унифицированный процесс (RUP).

Каскадная модель (Waterfall), разработанная У. Ройсом в 1970 г., предполагает строго последовательное прохождение фаз: сбор требований, проектирование, реализация, тестирование, внедрение и сопровождение. Достоинствами модели являются предсказуемость, детальная документированность и удобство планирования. Однако жесткость структуры делает ее малопригодной для проектов с изменчивыми требованиями, характерными для корпоративных информационных систем. Возврат к предыдущей фазе влечет значительные временные и финансовые издержки.

Гибкие методологии (Agile), закрепленные в «Манифесте гибкой разработки» (Beck et al., 2001), провозглашают приоритет работающего программного обеспечения над исчерпывающей документацией, сотрудничества с заказчиком над согласованием условий контракта, а также готовность к изменениям над следованием первоначальному плану. Среди конкретных фреймворков наибольшее распространение получил Scrum, предполагающий итерационную разработку в виде спринтов (как правило, 2–4 недели), регулярные инспекции и адаптацию процессов. Agile демонстрирует высокую эффективность в условиях нестабильных требований, однако требует зрелой команды и постоянной вовлеченности заказчика.

Рационально-унифицированный процесс (RUP) представляет собой итерационную методологию, структурированную вокруг четырех фаз: начало,

уточнение, построение и передача. RUP акцентирует внимание на управлении рисками и архитектурных решениях на ранних стадиях проекта. Несмотря на универсальность, «тяжеловесность» RUP нередко ограничивает его применимость в небольших командах.

Сравнительный анализ методологий в контексте проектов автоматизации на платформе 1С представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение основных методологий управления разработкой

Критерий	**Waterfall**	**Scrum/Agile**	**RUP**	**Применительно к 1С-проектам**
Управление требованиями	Фиксированные	Динамические (backlog)	Эволюционные	Динамические: меняются с обновлениями вендора
Длительность цикла	Месяцы–годы	2–4 недели	3–6 месяцев	Короткие циклы предпочтительны
Документация	Исчерпывающая	Минимально необходимая	Ролевая	Баланс: ТЗ + wiki
Управление рисками	Позднее	Ранние демо	Акцент на рисках с Inception	Критично: риски обновлений типовой
Подходит для 1С?	Ограниченно	Да (с адаптацией)	Частично	–

Специфика управления разработкой на платформе 1С:Предприятие

Архитектурные особенности платформы

Платформа 1С:Предприятие 8.3 обладает рядом архитектурных особенностей, непосредственно влияющих на организацию процессов разработки. Во-первых, это встроенный механизм конфигурирования через визуальный конфигуратор или систему 1С:Enterprise Development Tools (EDT) на базе Eclipse, что накладывает ограничения на стандартные инструменты управления исходным кодом (Git). Во-вторых, наличие «хранилища конфигурации» – встроенного механизма версионирования, основанного на захвате объектов (object locking), существенно отличается от классических систем контроля версий с моделью слияния ветвей. В-третьих, разработка в экосистеме 1С неразрывно связана с обновлениями типовых конфигураций вендора, что порождает регулярные задачи по сравнению и интеграции изменений.

БИТ.ЦУЛ как отраслевая конфигурация выстраивается поверх типовой конфигурации, расширяя ее функциональность специализированными блоками. Это создает дополнительный уровень зависимостей: при каждом обновлении базовой конфигурации необходим анализ совместимости и, при необходимости, перенос доработок. Данный цикл формирует специфическую задачу управления конфигурацией, аналогичную управлению форком (fork) в open-source разработке.

Инструментальная база разработки на 1С

Современная экосистема разработки на 1С располагает набором специализированных инструментов, формирующих инфраструктуру DevOps-процессов. 1С:Enterprise Development Tools (EDT) – интегрированная среда разработки, обеспечивающая работу с конфигурацией в текстовом формате, совместимом с Git. В отличие от классического конфигуратора, EDT позволяет использовать полноценные инструменты ветвления и слияния. Фреймворк Vanessa Automation реализует BDD-подход к автоматизированному тестированию конфигураций 1С, позволяя создавать сценарные и регрессионные тесты. Инструмент статического анализа SonarQube с плагином BSL Community Language Server выявляет технический долг и нарушения стандартов разработки. Платформы непрерывной интеграции GitLab CI/CD и Jenkins обеспечивают автоматизацию сборки, тестирования и публикации релизов конфигурации.

Методологическая модель управления разработкой конфигурации БИТ.ЦУЛ

Обоснование выбора методологии

На основании проведенного сравнительного анализа и с учетом специфики разработки на платформе 1С предлагается применение итерационно-инкрементальной модели, обогащенной практиками Scrum. Данный выбор обусловлен следующими соображениями.

Первое. Требования к конфигурации БИТ.ЦУЛ не являются полностью фиксированными: они эволюционируют под влиянием изменений законодательства (ФСБУ, МСФО 16, нормативы ЦБ РФ), обновлений типовой конфигурации вендора, а также роста и трансформации бизнес-процессов заказчика. Это делает каскадную модель неприменимой в чистом виде.

Второе. Наличие сложившейся функциональной базы позволяет декомпозировать задачи разработки на относительно независимые инкременты, что соответствует логике итерационной модели.

Третье. Практики Scrum – бэклог продукта, планирование спринта, ежедневные встречи, демо и ретроспектива – обеспечивают прозрачность работ, своевременное выявление отклонений и вовлеченность заказчика без избыточной бюрократизации.

Управление требованиями

Управление требованиями в проекте разработки конфигурации БИТ.ЦУЛ предлагается организовать в виде двухуровневой модели. На стратегическом уровне формируется «Дорожная карта продукта» (Product Roadmap), охватывающая горизонт 6–12 месяцев и согласованная с бизнес-целями лизинговой компании. На тактическом уровне ведется «Бэклог продукта» (Product Backlog) – приоритизированный реестр пользовательских историй и технических задач, детализируемых перед каждым спринтом.

Пользовательская история формулируется по шаблону: «Как [роль пользователя] я хочу [функциональность], чтобы [бизнес-ценность]». Критерии приемки фиксируются в формате Given-When-Then и служат основой для автоматизированных тестов в Vanessa Automation.

Особого внимания требует управление «регуляторными требованиями» – изменениями, инициируемыми обновлениями нормативной базы или типовых конфигураций 1С. Для их обработки рекомендуется выделение отдельной категории задач с обязательным анализом влияния (impact analysis) на существующий функционал.

Управление ветвлением и версионированием

Для проектов на базе EDT предлагается адаптированная стратегия ветвления, основанная на модели GitFlow. Основными ветвями являются: main (стабильная продуктивная версия), develop (интеграционная ветвь для текущей разработки) и feature-ветви для отдельных задач или пользовательских историй. Дополнительно выделяются release-ветви для подготовки релиза и hotfix-ветви для экстренных исправлений в продуктивной среде.

Ключевой проблемой версионирования в экосистеме 1С является управление обновлениями типовой конфигурации. При выходе нового обновления типовой конфигурации создается ветвь vendor-update/X.X.X, в которой выполняется сравнение изменений вендора с текущей версией доработок. Выявленные конфликты разрешаются в этой ветви, после чего она вливается в develop.

Процессы тестирования

Качество конфигурации БИТ.ЦУЛ обеспечивается многоуровневой моделью тестирования. Юнит-тестирование отдельных процедур и функций выполняется с использованием фреймворка xUnitFor1C. Функциональное тестирование пользовательских сценариев автоматизируется средствами Vanessa Automation на основе сценариев в формате Gherkin. Регрессионное тестирование запускается автоматически при каждом слиянии в develop-ветвь в рамках CI-пайплайна. Нагрузочное тестирование выполняется перед мажорными релизами.

Критически важным элементом является использование статического анализатора BSL Community Language Server, интегрированного в IDE и CI-пайплайн. Анализатор выявляет нарушения стандартов разработки 1С, потенциальные ошибки и проблемы производительности до этапа тестирования.

Релизный процесс

Релизный процесс конфигурации БИТ.ЦУЛ предлагается организовать на основе следующей модели. По завершении каждого спринта (2 недели) формируется внутренний релиз-кандидат, проходящий регрессионное тестирование. Мажорные релизы выпускаются с периодичностью 1 раз в квартал и проходят обязательное нагрузочное тестирование и приемочное тестирование заказчиком (UAT). Экстренные исправления (hotfix) выпускаются по мере необходимости вне плановых релизных окон.

Семантическое версионирование конфигурации рекомендуется вести по схеме MAJOR.MINOR.PATCH, где MAJOR – значительные архитектурные изменения, MINOR – добавление нового функционала, PATCH – исправление ошибок. Итоговая структура процессов представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры релизного процесса конфигурации БИТ.ЦУЛ

Тип релиза	Периодичность	Тип тестирования	Критерии готовности
Внутренний (sprint release)	Каждые 2 недели	Регрессионное (авто)	Пройдены все авто-тесты
Мажорный (quarterly release)	1 раз в квартал	Нагрузочное + UAT	Согласование заказчика
Патч (hotfix)	По необходимости	Smoke-тесты	Исправлен критичный дефект

Практические рекомендации по организации процессов

На основании предложенной методологической модели сформулированы практические рекомендации для команд, ведущих разработку конфигурации БИТ.ЦУЛ.

Формирование команды. Оптимальный состав для типового проекта сопровождения и развития конфигурации включает: Владельца продукта (Product Owner) – представителя заказчика с полномочиями для приоритизации бэклога; Scrum-мастера; 2–4 разработчика 1С с опытом работы в EDT; аналитика-постановщика; специалиста по тестированию. При численности команды свыше 7–8 человек рекомендуется применение масштабированных Agile-фреймворков (SAFe, LeSS) или разделение на компонентные команды по функциональным блокам конфигурации.

Управление техническим долгом. Специфика разработки на 1С предполагает постепенное накопление технического долга, связанного с быстрыми доработками «под задачу» и обходными решениями при обновлениях типовых конфигураций. Рекомендуется резервировать не менее 20% емкости каждого спринта на рефакторинг, документирование и устранение технического долга. Контроль уровня технического долга осуществляется через метрики SonarQube.

Управление знаниями. Документация конфигурации ведется в корпоративной wiki-системе по принципу «документация как код»: любое изменение функционала сопровождается актуализацией соответствующих страниц wiki. Видеозаписи демо-сессий сохраняются как артефакты спринта и используются при обучении новых сотрудников.

Заключение

В ходе исследования проведен сравнительный анализ применимости основных методологий управления разработкой программного обеспечения к специфике проектов создания и сопровождения конфигурации БИТ.Центр Управления Лизингом на платформе 1С:Предприятие 8.3. Показано, что ни каскадная, ни классическая Agile-модель в чистом виде не обеспечивают оптимального управления данным классом проектов ввиду сочетания стабильной архитектурной базы с высокой изменчивостью требований.

Предложена итерационно-инкрементальная методологическая модель, интегрирующая Scrum-практики с адаптированной стратегией ветвления (GitFlow) и инструментами DevOps для экосистемы 1С. Модель описывает ключевые процессы управления требованиями, версионированием, тестированием и релизным циклом.

Перспективами дальнейших исследований являются: разработка системы метрик эффективности процессов разработки конфигурации (cycle time, lead time, deployment frequency), исследование применимости MLOps-подходов к автоматизированному тестированию конфигураций 1С, а также анализ особенностей масштабирования предложенной модели для крупных распределенных команд разработки.

Список литературы:

1. Beck K., Beedle M., van Bennekum A. et al. Manifesto for Agile Software Development [Электронный ресурс]. – 2001. – URL: https://agilemanifesto.org (дата обращения: 15.03.2025).

2. Schwaber K., Sutherland J. The Scrum Guide. The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game. – 2020. – 16 p.

3. Royce W. Managing the Development of Large Software Systems // Proceedings of IEEE WESCON. – 1970. – P. 328-338.

4. Kruchten P. The Rational Unified Process: An Introduction. – 3rd ed. – Addison-Wesley, 2004. – 319 p.

5. Радченко М.Г., Хрусталева Е.Ю. 1С:Предприятие 8.3. Практическое пособие разработчика. – М.: ООО «1С-Паблишинг», 2013. – 963 с.

6. Стандарты разработки конфигураций на платформе «1С:Предприятие» [Электронный ресурс] // Система стандартов и методик разработки конфигураций (ITS 1C). – URL: https://its.1c.ru/db/v8std (дата обращения: 11.06.2026).

7. Kim G., Humble J., Debois P., Willis J. The DevOps Handbook. – IT Revolution Press, 2016. – 437 p.

8. Driessen V. A successful Git branching model [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: https://nvie.com/posts/a-successful-git-branching-model (дата обращения: 10.03.2025).

9. Мартынова, Т. Л. Управление IT-проектами: учебное пособие / Т. Л. Мартынова. – Москва: Издательский центр Университета имени О.Е. Кутафина (МГЮА), 2022. – 76 с.

10. Первый БИТ. Описание конфигурации БИТ.Центр Управления Лизингом [Электронный ресурс]. – URL: https://www.1cbit.ru (дата обращения: 20.03.2025).

УДК 004.8

Алланазарова Лейли, Мандарова Огулсурай, Одеева Огулшат, Черрикова Гулалек
Туркменский сельскохозяйственный институт, Дашогуз, Туркменистан

ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

Аннотация. Статья посвящена применению глубоких нейросетей для анализа больших данных. Рассмотрены архитектуры CNN, RNN, трансформеры и гибридные модели, их эффективность в классификации, прогнозировании, обнаружении аномалий и медицинской диагностике. Описаны технологические решения, позволяющие добиться шестикратного ускорения обучения и повысить загрузку GPU с 10–15% до более чем 60%.

Ключевые слова: глубокие нейронные сети, большие данные, интеллектуальные системы, машинное обучение, глубокое обучение, масштабируемость, распределенные вычисления, обнаружение вторжений, прогнозное обслуживание, обнаружение мошенничества, медицинская диагностика.

Введение. В эпоху цифровой экономики данные стали одним из наиболее ценных ресурсов. В 2020-х годах человечество производит колоссальные объемы информации — от миллионов транзакций в финансовых системах до терабайтов сенсорных данных с устройств промышленного Интернета вещей (IIoT). Однако данные сами по себе представляют лишь сырой материал. Ключевым фактором, определяющим конкурентное преимущество и эффективность в современном мире, стала способность извлекать из этих огромных массивов ценные знания и закономерности, то есть осуществлять интеллектуальный анализ больших данных (Big Data Analytics). Это привело к формированию концепции больших данных, описываемой традиционными характеристиками: объем (Volume), скорость (Velocity) и разнообразие (Variety) [8]. По мере усложнения задач к ним добавились и другие V-характеристики: достоверность (Veracity) и ценность (Value). Традиционные статистические методы и даже классические алгоритмы машинного обучения часто оказываются бессильны перед этими вызовами, так как требуют ручного конструирования признаков (feature engineering) и не могут эффективно масштабироваться на петабайтные наборы данных.

Именно здесь на сцену выходят глубокие нейронные сети (DNN), которые произвели революцию в области искусственного интеллекта и стали основным драйвером современных систем обработки больших данных. В отличие от традиционных методов, глубокое обучение, вдохновленное структурой

биологических нейронных сетей, способно автоматически, в процессе обучения, выявлять иерархические представления данных. Многослойная архитектура позволяет сети на каждом уровне выделять все более абстрактные признаки: от простых линий и краев в первых слоях сверточных сетей (CNN) до сложных семантических концепций в последующих [7]. Эта способность к автоматическому извлечению признаков (feature learning) делает DNN универсальным инструментом для работы с неструктурированными и мультимодальными данными, такими как изображения, видео, аудио, тексты и временные ряды, которые составляют значительную часть больших данных [9]. Глубокое обучение, движимое доступностью больших данных и ростом вычислительных мощностей (в частности, графических процессоров, GPU), стало ядром многих прорывных технологий — от систем распознавания лиц до автономных транспортных средств и интеллектуальных медицинских диагностов [7].

Актуальность данной работы обусловлена стремительным развитием и проникновением технологий глубокого обучения во все ключевые сферы, связанные с обработкой больших данных. Переход от теоретических исследований к практическим инженерным и продуктовым решениям требует систематизации накопленных знаний. Существует множество обзоров, посвященных либо отдельным архитектурам нейронных сетей, либо их применению в конкретных предметных областях. Например, известны работы, охватывающие фундаментальные принципы глубокого обучения [7], всесторонний обзор его приложений в компьютерном зрении, NLP и робототехнике [9], а также обзор методов машинного обучения для аналитики больших данных [10]. Однако ощущается недостаток исследований, которые бы комплексно, с единых позиций, рассматривали всю экосистему: от архитектурных решений до технологий масштабирования и прикладных аспектов в наиболее динамичных отраслях.

Целью настоящей работы является систематический анализ современных применений глубоких нейронных сетей в интеллектуальных системах обработки больших данных. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: (1) рассмотреть основные архитектуры DNN (CNN, RNN, трансформеры, гибридные модели) и их роль в интеллектуальном анализе данных; (2) проанализировать технологические подходы к масштабированию глубокого обучения (распределенные вычисления, оптимизация конвейеров данных) для работы с большими объемами информации; (3) исследовать ключевые прикладные области: промышленность (IIoT, обнаружение аномалий, прогнозное обслуживание), финансы (обнаружение мошенничества) и здравоохранение (медицинская диагностика); и (4) выявить ключевые вызовы и направления дальнейшего развития.

Методологическую основу работы составляет систематический обзор и анализ современной научной литературы, включая публикации в ведущих международных журналах (Artificial Intelligence Review, Nature Scientific Reports, Diagnostics, Sensors), материалы конференций (EuroSys) и актуальные препринты (arXiv) за период 2024–2026 гг. Выборка источников охватывает как обзорные статьи, задающие общий контекст, так и оригинальные исследования, демонстрирующие конкретные технологические достижения.

Архитектурные подходы глубокого обучения. Анализ современной литературы показывает, что глубокие нейронные сети представляют собой не единый алгоритм, а семейство архитектур, каждая из которых наилучшим образом подходит для определенного типа задач. Выбор правильной архитектуры является критическим фактором успеха при построении интеллектуальной системы обработки больших данных.

Сверточные нейронные сети (CNN). Исторически CNN стали первой широко распространенной архитектурой глубокого обучения. Они великолепно справляются с обработкой данных, имеющих сетчатую (grid-like) топологию, прежде всего — изображений. Основная идея заключается в использовании операций свертки, которые, проходя по входному изображению, выделяют пространственные признаки: края, углы, текстуры на ранних слоях и более сложные объекты (глаза, колеса) — на более глубоких [7]. В контексте обработки больших данных CNN успешно применяются не только для задач компьютерного зрения. Например, в промышленности сверточные сети используются для анализа спектрограмм вибрации оборудования или для обработки тепловизионных изображений в системах прогнозного обслуживания. Авторы обзора состояния искусственного интеллекта в производстве в 2025 году отмечают, что CNN-LSTM гибриды стали лидерами по точности в задачах прогнозного обслуживания, достигая F-меры 0,964.

Рекуррентные нейронные сети (RNN) и LSTM. Если CNN ориентированы на пространственные данные, то RNN и их усовершенствованные версии — сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM) — предназначены для обработки последовательных данных (временных рядов, текстов, аудиосигналов). Структура RNN содержит циклы обратной связи, позволяющие информации сохраняться внутри сети, что делает их способными учитывать контекст предыдущих элементов последовательности. Однако классические RNN страдают от проблем затухающего градиента. LSTM решают эту проблему с помощью специальных ячеек памяти и механизмов «вентилей» (input, forget, output gates), что позволяет им удерживать информацию на протяжении очень длинных последовательностей [9]. LSTM являются доминирующей архитектурой для анализа финансовых транзакций, потоков сенсорных данных и текстов.

В последние годы наблюдается тенденция к созданию гибридных моделей, объединяющих сильные стороны различных архитектур. Так, в статье, посвященной обнаружению вторжений в IIoT-сетях 6G, авторы предложили гибридную модель, объединяющую глубокую нейронную сеть (DNN) для извлечения глобальных признаков, двунаправленный рекуррентный блок (BiGRU) для захвата временных зависимостей и механизм внимания (attention mechanism) для фокусировки на ключевых аномалиях. В экспериментах на датасете Edge-IIoTset модель достигла точности 96,88%, превзойдя такие бенчмарки, как ANN, CNN и DNN-LSTM. Этот пример иллюстрирует, как комбинация различных типов слоев позволяет создать более мощный и адаптивный инструмент для анализа сложных многомерных данных.

Параллельно с этим, архитектура трансформеров (Transformer), изначально разработанная для задач обработки естественного языка, быстро завоевывает популярность в других областях. Ключевое нововведение трансформеров — механизм самовнимания (self-attention), который позволяет модели учитывать взаимосвязи между всеми элементами последовательности, независимо от расстояния между ними, что делает их чрезвычайно эффективными для анализа долгосрочных зависимостей. Однако прямое применение трансформеров для обслуживания промышленных устройств сталкивается с проблемами, связанными с многомасштабными временными корреляциями и ограниченным размером наборов данных. В работе предлагается облегченный Multi-scale Transformer (MsFormer), который включает модуль многомасштабной выборки и упрощенный механизм внимания. Эксперименты показали, что MsFormer значительно превосходит существующие методы и демонстрирует высокую обобщающую способность, что подтверждает эффективность архитектур трансформеров в промышленных приложениях.

Масштабирование глубокого обучения для больших данных. Эффективность глубоких нейронных сетей напрямую зависит от объема данных, на которых они обучаются. Однако обучение моделей на датасетах, насчитывающих десятки терабайт, создает критические проблемы, связанные с утилизацией аппаратного обеспечения и воспроизводимостью результатов. По мере того как вычислительные мощности GPU стремительно растут, конвейеры загрузки данных часто не успевают, что приводит к простою дорогостоящих ускорителей. В исследовании [12] описана ситуация, когда в промышленных конвейерах глубокого обучения высокопроизводительные GPU простаивали на 10–15% времени, ожидая очередной порции данных из-за перегрузки сети и затрат на преобразование форматов. Авторы предложили серию оптимизаций, включая передачу CPU-нагрузки на рабочие узлы и систему локального кэширования FanoutCache. Эти оптимизации привели к ускорению в 6 раз,

сократив общее время обучения с 22 до примерно 3 часов, подняв загрузку GPU до 60% и сократив вычислительные затраты почти на 80% [12].

Другой аспект масштабирования связан с обучением на данных из нескольких источников. В работе [11] представлена архитектура MegaScale-Data, предназначенная для обучения больших фундаментальных моделей на мульти-источниковых наборах данных. Проблема заключается в неравномерном распределении выборок и чрезмерном потреблении памяти при работе с большим количеством разнородных датасетов. Архитектура MegaScale-Data внедряет раздельную предобработку данных с использованием ролевых акторов и централизованное управление данными. Благодаря этим инновациям удалось повысить пропускную способность обучения в 4,5 раза и сократить использование памяти CPU в 13,5 раза [11]. Эти работы показывают, что проектирование высокопроизводительных и масштабируемых систем глубокого обучения — это не только создание эффективных моделей, но и инженерное искусство построения распределенных конвейеров обработки данных.

Промышленность и Интернет вещей (IIoT). IIoT является одной из наиболее динамично развивающихся областей применения глубокого обучения. Сети IIoT генерируют огромные потоки сенсорных данных в реальном времени, которые необходимо анализировать для обеспечения безопасности, эффективности и непрерывности производства. В статье рассматривается проблема обнаружения киберугроз в сетях IIoT нового поколения (с поддержкой 6G). Разработанная гибридная модель с механизмом внимания (DNN-BiGRU-Attention) демонстрирует высокую эффективность, выявляя сложные, разнородные и динамические угрозы. Другим важнейшим приложением является прогнозное обслуживание (Predictive Maintenance, PdM). Глобальный рынок PdM, по прогнозам, превысит 28 миллиардов долларов к 2028 году, а внедрение ИИ, по сообщениям, сокращает незапланированные простои оборудования до 70%. Обзоры подчеркивают, что CNN-LSTM гибриды являются лидерами по точности, однако в промышленных условиях все большее значение приобретает интерпретируемость, которую обеспечивают нейро-символические подходы.

Финансовая сфера. В финансовом секторе глубокое обучение стало незаменимым инструментом в борьбе с мошенничеством. Традиционные системы, основанные на статических правилах, не справляются с растущим объемом цифровых транзакций и постоянно эволюционирующими схемами мошенничества. В работе предлагается гибридная платформа, объединяющая контролируемую глубокую нейронную сеть (DNN) для выявления сложных транзакционных паттернов и автоэнкодер для неконтролируемого обнаружения аномалий. Эксперименты на финансовых датасетах показали, что гибридная система значительно превосходит существующие методы по таким показателям,

как точность и полнота, и подчеркивает масштабируемость подхода для приложений реального времени. Дальнейшее развитие эта идея получила в работе, где для оптимизации гиперпараметров гибридной модели (LSTM + автоэнкодер) был применен алгоритм роя кошек (CSO). Эта модель, оптимизированная для облачных вычислений, достигла точности 96,2% и продемонстрировала высокую эффективность при работе с несбалансированными данными.

Здравоохранение. Здравоохранение является одной из наиболее ответственных и многообещающих областей для применения глубокого обучения. Анализ больших медицинских данных (изображения МРТ и КТ, геномные данные, электронные медицинские карты) открывает путь к персонализированной и предиктивной медицине. В обзоре подчеркивается, что интеграция ИИ и больших данных способна вывести точность диагностики на уровень 95% и значительно сократить издержки. Авторы подробно рассматривают приложения в прогнозировании заболеваний, анализе медицинских изображений и открытии лекарств. В диссертационной работе представлены три взаимодополняющих подхода к созданию глубоких обучающих систем для клинических данных: байесовская модель сегментации для МРТ пациентов с глиобластомой, контрастный метод обучения для выявления дефектов на КТ и мультимодальная модель на основе внимания для прогнозирования выживаемости по комбинации МРТ, геномных и клинических данных. Эти работы демонстрируют, что глубокое обучение способно не только автоматизировать, но и превзойти человека в сложных задачах клинической диагностики.

Заключение. Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что глубокие нейронные сети перешли из стадии академических исследований в фазу активного промышленного и коммерческого внедрения, став ключевым компонентом современных интеллектуальных систем обработки больших данных. Универсальность DNN позволяет им эффективно работать с самыми разными типами данных — от пространственных изображений до временных рядов, а способность автоматически извлекать иерархические признаки открывает путь к решению задач, которые ранее были не под силу вычислительным системам.

Архитектуры глубоких сетей эволюционировали: от CNN и RNN/LSTM, сохраняющих свою актуальность для специфических задач, к более мощным гибридным моделям и трансформерам, способным улавливать сложные взаимосвязи в данных. Однако, независимо от сложности модели, ее эффективность напрямую зависит от возможности масштабировать обучение. Достижения в области распределенных вычислений и оптимизации конвейеров обработки данных, позволяющие ускорить обучение в 6 раз и повысить загрузку GPU до 60% и выше, делают возможным обучение моделей на датасетах

эксабайтного масштаба. Что касается прикладных областей, то промышленное прогнозное обслуживание, финансовый фрод-мониторинг и медицинская диагностика становятся «полигонами» для отработки передовых архитектур. Везде наблюдается сдвиг в сторону гибридных и мультимодальных решений, которые не только повышают точность, но и начинают отвечать на вызовы интерпретируемости и работы с несбалансированными и распределенными данными.

Новизна настоящей работы заключается в системном и междисциплинарном подходе к анализу применения DNN. В отличие от узкоспециализированных обзоров, данная работа синтезирует знания из различных областей, выявляя общие тренды и технологические решения, лежащие в основе интеллектуальных систем. Практическая значимость состоит в предоставлении актуальной и структурированной картины современного ландшафта технологий глубокого обучения, что может служить отправной точкой как для разработчиков, выбирающих архитектуру для своей системы, так и для исследователей, определяющих направления для будущих работ.

Несмотря на впечатляющие успехи, сохраняется ряд проблем. Во-первых, необходимость в «объяснимом ИИ» (XAI) с целью повышения прозрачности и интерпретируемости решений, принимаемых нейросетями, особенно в таких ответственных сферах, как медицина и финансы. Во-вторых, это проблемы конфиденциальности, частично решаемые с помощью федеративного обучения, которое позволяет обучать модели на децентрализованных данных. В-третьих, это энергоэффективность, поскольку обучение современных моделей требует огромных вычислительных ресурсов и, соответственно, затрат электроэнергии. Решение этих проблем будет определять будущее глубокого обучения — движение в сторону более легковесных, адаптивных и ответственных интеллектуальных систем.

Список литературы:

1. Башкыр, М. Б. Обзор методов глубокого обучения в среде больших данных / М. Б. Башкыр, Э. Б. Мамак Экинджи, Г. Йылдырым, П. Токташ // Статистика и наука о данных: концепции, методы и приложения. – Анкара: Nobel Yayınevi, 2025. – С. 331-341.
2. Гибридный подход глубокого обучения с временной осведомленностью для интеллектуального обнаружения вторжений в сетях IIoT с поддержкой 6G // Scientific Reports. – 2026. – Т. 16. – Ст. 13474. – DOI 10.1038/s41598-026-43058-x.
3. Кабир, Т. Платформы глубокого обучения для диагностики заболеваний и прогнозирования общей выживаемости с использованием изображений, геномных и клинических данных / Т. Кабир. – Хьюстон: UTHealth Houston, 2025. – 58 с.
4. Миттал, К. Оптимизация высокопроизводительных распределенных конвейеров данных для воспроизводимого глубокого обучения в масштабе / К. Миттал, Д. Ю, Р. Кетаби и др. // arXiv:2604.21275. – 2026.
5. Hoop, M. X. M. Обзор современных приложений глубокого обучения и вызовов / M. X. M. Hoop, A. O. Иге // arXiv:2403.17561. – 2025. – DOI 10.48550/arXiv.2403.17561.

6. Рани, С. Интеллектуальные системы здравоохранения на основе машинного обучения в эпоху больших данных: приложения, диагностические идеи, проблемы и этические последствия / С. Рани, Р. Кумар, Б. С. Панда и др. // Diagnostics. – 2025. – Т. 15, № 15. – Ст. 1914. – DOI 10.3390/diagnostics15151914.

7. Тянь, К. Обзор основ глубокого обучения / К. Тянь, Т. Чэн, З. Пэн [и др.] // Artificial Intelligence Review. – 2025. – Т. 58, № 12. – Ст. 381. – DOI 10.1007/s10462-025-11368-7.

8. Фирузи, А. DeepSense: адаптивная масштабируемая ансамблевая платформа для обнаружения аномалий в промышленном интернете вещей / А. Фирузи, А. А. Горбани // Sensors. – 2026. – Т. 26, № 9. – Ст. 2662. – DOI 10.3390/s26092662.

9. Цюй, Ю. Гибридная платформа глубокого обучения с оптимизацией роем кошек для облачного обнаружения финансового мошенничества / Ю. Цюй, Ц. Ван // Mathematics. – 2026. – Т. 14, № 8. – Ст. 1355. – DOI 10.3390/math14081355.

10. Чжао, Дж. MegaScale-Data: масштабирование загрузчика данных для обучения больших фундаментальных моделей из нескольких источников / Дж. Чжао и др. // European Conference on Computer Systems (EuroSys’26). – 2026. – DOI 10.1145/3767295.3803568.

11. Чжоу, Ц. MsFormer: обеспечение надежных услуг прогнозного обслуживания для промышленных устройств / Ц. Чжоу и др. // arXiv:2603.23076. – 2026.

УДК 620.17:536.2

Таганов Чарымырат
Туркменский государственный архитектурно-строительный институт, Ашхабад, Туркменистан

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В статье рассмотрено влияние температурных воздействий (повышенных, пониженных и циклических) на механические свойства конструкционных материалов: металлов, сплавов, полимеров, композитов и наноматериалов. Проанализированы изменения прочности, пластичности, модуля упругости, ударной вязкости, а также явления хладноломкости, ползучести, релаксации напряжений и термической усталости. Показана роль температурных деформаций в возникновении термических напряжений и разрушении деталей. Приведены практические рекомендации по выбору материалов и защите от температурных воздействий.

Ключевые слова: температурные воздействия, механические свойства, прочность, пластичность, хрупкость, ползучесть, термическая усталость, хладноломкость, жаропрочность, наноматериалы.

Введение. Температура является одним из наиболее значимых внешних факторов, определяющих работоспособность и долговечность материалов в конструкциях, машинах и приборах. В реальных условиях эксплуатации детали и узлы подвергаются воздействию как повышенных, так и пониженных температур, а также их циклическим перепадам. Диапазон рабочих температур простирается от криогенных (ниже –150 °C) до сверхвысоких (более 1000 °C) в авиационных двигателях, газовых турбинах, космической технике, энергетическом и химическом оборудовании. При этом механические свойства материала — прочность, пластичность, модуль упругости, трещиностойкость, сопротивление ползучести и усталости — могут изменяться в десятки раз по сравнению с комнатнотемпературными значениями. Понимание этих изменений необходимо для корректного проектирования, выбора материала и прогнозирования ресурса.

При низких температурах для многих металлов и сплавов характерно явление хладноломкости — резкий переход из вязкого состояния в хрупкое. Особенно сильно это проявляется у материалов с объёмно-центрированной кубической (ОЦК) решёткой (ферритные стали, вольфрам, молибден). Предел прочности при этом может возрастать, но пластичность и ударная вязкость падают практически до нуля. Например, для строительных сталей порог хладноломкости часто лежит в интервале от –20 до –60 °C. В криогенной технике (хранение сжиженных газов, ракетные баки) применяют аустенитные нержавеющие стали и никелевые сплавы с гранецентрированной кубической

(ГЦК) решёткой, которые сохраняют вязкость вплоть до температуры жидкого гелия. Полимеры при охлаждении переходят в стеклообразное состояние, становясь жёсткими и хрупкими.

Противоположная картина наблюдается при нагреве. С повышением температуры прочностные характеристики (пределы текучести и прочности) снижаются, а пластичность обычно возрастает — до определённого предела. Однако при температурах выше 0,4–0,5 от температуры плавления (в Кельвинах) начинают активно развиваться процессы ползучести и релаксации напряжений. Ползучесть — это непрерывное пластическое деформирование материала во времени при постоянном напряжении, которое может привести к недопустимым изменениям геометрии детали или её разрушению. Скорость ползучести экспоненциально зависит от температуры. Для жаропрочных никелевых сплавов, применяемых в лопатках газовых турбин, рабочая температура достигает 1000–1100 °C, но даже там ползучесть лимитирует ресурс [4, с. 30]. Согласно справочным данным по расчёту на прочность и долговечность, уже при умеренных температурах необходимо учитывать релаксацию напряжений в резьбовых соединениях и фланцах [5, с. 112].

Отдельную проблему представляет термическая усталость — разрушение при циклическом изменении температуры. При нагреве и охлаждении в материале возникают знакопеременные термические напряжения, обусловленные ограничением свободного теплового расширения. Эти напряжения, даже без внешней механической нагрузки, могут вызвать зарождение и рост трещин. Характерный пример — трещины в теплообменниках, выхлопных коллекторах, футеровках печей. Для бетонов и строительных материалов температурно-коррозионные воздействия особенно опасны, так как сочетание перепадов температур с агрессивной средой резко снижает трещиностойкость и долговечность конструкций [6, с. 45].

В последние десятилетия активно исследуются наноматериалы и наноструктуры, механические свойства которых при температурных воздействиях отличаются от объёмных аналогов. Нанокристаллические материалы, благодаря малому размеру зёрен, проявляют сверхпластичность при сравнительно низких температурах, однако их термическая стабильность ограничена из-за склонности к росту зёрен. Углеродные наноструктуры (фуллерены, нанотрубки, графен) сохраняют высокую прочность и модуль упругости в широком диапазоне температур, но их практическое применение в композитах требует решения проблем совместимости с матрицей [3, с. 260].

При проектировании многослойных ограждающих конструкций (в строительстве, авиации, ракетостроении) необходимо учитывать разницу коэффициентов линейного расширения слоёв, которая при перепадах температур ведёт к возникновению значительных внутренних напряжений и возможному расслоению. Арамидные и другие полимерные композиты при

нагреве выше температуры стеклования теряют несущую способность, поэтому для них критичны пиковые перегревы.

Таким образом, учёт температурных воздействий — обязательный этап расчёта на прочность, долговечность и безопасную устойчивость конструкций. Целью данной статьи является систематизация основных закономерностей изменения механических свойств материалов под действием температуры и формулировка практических рекомендаций для инженерного проектирования. Далее будут подробно рассмотрены: влияние низких температур (хладноломкость), влияние высоких температур (снижение прочности, ползучесть, релаксация), термическая усталость, а также особенности поведения специальных материалов — наноструктур, композитов и бетонов. В заключение приведены подходы к выбору материалов и способы защиты от неблагоприятных температурных воздействий.

Влияние низких температур (хладноломкость). При понижении температуры окружающей среды ниже 0 °C и особенно в области криогенных температур (ниже –150 °C) механическое поведение большинства конструкционных материалов претерпевает кардинальные изменения. Для металлов с объёмно-центрированной кубической (ОЦК) решёткой – ферритные и перлитные стали, вольфрам, молибром, хром – характерно резкое падение ударной вязкости при переходе через некоторый температурный интервал, называемый порогом хладноломкости. Выше этого порога материал разрушается вязко с заметной пластической деформацией, ниже – хрупко, практически без пластических деформаций, по механизму отрыва или скола.

Причина явления – температурная зависимость напряжения текучести и напряжения скола. С понижением температуры напряжение текучести (сопротивление пластической деформации) растёт значительно быстрее, чем напряжение скола (сопротивление хрупкому разрушению). При некоторой температуре эти кривые пересекаются, и дальнейшее охлаждение делает скол более энергетически выгодным. Для низкоуглеродистых строительных сталей порог хладноломкости обычно лежит в диапазоне от –20 до –40 °C. Это означает, что при зимней эксплуатации мостов, кранов, трубопроводов, опор ЛЭП возможно внезапное хрупкое разрушение без предварительных деформаций, что крайне опасно.

Для металлов с гранецентрированной кубической (ГЦК) решёткой (алюминий, медь, никель, аустенитные нержавеющие стали) напряжение текучести слабо зависит от температуры, поэтому они сохраняют высокую пластичность и вязкость вплоть до температуры жидкого гелия (4 К). Именно поэтому криогенная техника (ёмкости для сжиженного природного газа, ракетные баки с жидким кислородом и водородом) изготавливается из аустенитных сталей типа 12Х18Н10Т или сплавов на никелевой основе.

Однако у этих материалов при криогенных температурах наблюдается аномальный рост прочности (предел текучести может возрасти в 1,5–2 раза), что иногда используется для создания высоконагруженных деталей.

Полимерные материалы при охлаждении переходят из высокоэластичного в стеклообразное состояние. Температура стеклования (T_c) для разных полимеров варьируется: для полиэтилена низкой плотности около –120 °C, для поливинилхлорида – около +80 °C. Ниже T_c полимер становится жёстким, хрупким, его ударная вязкость падает на порядок. Это важно учитывать при эксплуатации пластмассовых деталей на Севере или в космосе. Арамидные волокна, обладающие высокой теплостойкостью, при криогенных температурах сохраняют прочностные характеристики, но их удлинение при разрыве снижается.

Для нанокристаллических материалов влияние низких температур имеет особенности. Из-за высокой доли границ зёрен, где диффузия облегчена, нанокристаллы могут сохранять некоторую пластичность даже при низких температурах, однако рост зёрен при охлаждении не происходит, что стабилизирует структуру.

Практические выводы: при проектировании конструкций, работающих при отрицательных температурах, необходимо:

- выбирать материалы с низким или отсутствующим порогом хладноломкости (ГЦК-структуры);
- проводить ударные испытания (KCU, KCV) при температурах, равных минимальной рабочей;
- избегать концентраторов напряжений (надрезов, сварных швов с острыми краями), так как при низких температурах чувствительность к надрезу резко возрастает.

Влияние высоких температур (снижение прочности, ползучесть, релаксация). С повышением температуры поведение материалов определяется двумя конкурирующими процессами: с одной стороны, возрастает подвижность атомов и облегчается пластическое течение, с другой – активируются диффузионные механизмы, приводящие к разупрочнению и структурным изменениям.

Снижение прочности и модуля упругости. Для большинства металлов и сплавов при нагреве до 300–500 °C (для алюминиевых и магниевых сплавов – до 200–300 °C) наблюдается монотонное падение пределов прочности и текучести. Модуль упругости (модуль Юнга) также снижается, примерно на 0,5–1 % на каждые 100 °C для сталей и на 1–2 % для алюминия. Это означает, что при высоких температурах деталь становится более податливой, и упругие деформации под нагрузкой возрастают.

Пластичность при умеренном нагреве (до 0,3–0,4 T_пл) обычно увеличивается – материал становится более вязким и способным

перераспределять локальные перегрузки. Однако при приближении к температуре плавления пластичность может резко упасть из-за окисления границ зёрен, образования легкоплавких эвтектик или межкристаллитной хрупкости.

Ползучесть. При температурах выше 0,4 T_пл (в Кельвинах) для металлов и выше 0,5 T_пл для керамик начинается интенсивное развитие ползучести – необратимого деформирования во времени под действием постоянного напряжения. Классическая кривая ползучести включает три стадии: первичную (замедляющаяся), вторичную (стационарная, с постоянной скоростью) и третичную (ускоряющаяся, предшествующая разрушению). Скорость стационарной ползучести описывается эмпирическим степенным законом Нортона-Бейли и экспоненциально зависит от температуры (активационный механизм). Для жаропрочных никелевых сплавов (Инконель, ЖС6У) скорость ползучести при 900 °C может составлять 10^{-5} – 10^{-6} %/час, что позволяет обеспечить ресурс тысяч часов.

Расчёт деталей на ползучесть и длительную прочность – обязательная процедура для турбинных лопаток, паропроводов, камер сгорания, реакторов. Как отмечено в справочнике по расчётам на прочность и долговечность, для ответственных узлов необходимо учитывать не только кратковременные характеристики, но и деформации ползучести за весь срок службы.

Релаксация напряжений. Если деталь с начальным натягом (например, резьбовое соединение, пружина) эксплуатируется при повышенной температуре, то вследствие ползучести происходит постепенное снижение (релаксация) начальных напряжений при постоянной деформации. Для фланцевых соединений паропроводов это может привести к потере герметичности. Методы борьбы: использование высокотемпературных уплотнительных материалов, периодическая подтяжка, применение пружин из сплавов с низкой скоростью релаксации (например, ЭИ435).

Структурные и фазовые превращения. Нагрев может вызывать необратимые изменения: отпуск закалённых сталей (снижение твёрдости, повышение вязкости), старение дисперсионно-твердеющих сплавов (выделение интерметаллидов), графитизацию углеродистых сталей (образование графитовых включений, охрупчивающих материал). В многослойных конструкциях, например, ограждающих элементах зданий, различие коэффициентов теплового расширения слоёв приводит к возникновению термических напряжений, которые при многократных нагревах могут вызвать расслоение и трещины.

Термическая усталость. Циклические изменения температуры (нагрев-охлаждение) даже при отсутствии внешних механических нагрузок вызывают знакопеременные термические напряжения. Их амплитуда определяется коэффициентом линейного расширения α, перепадом температур ΔT и

степенью стеснения деформаций. Для жёстко закреплённой детали термическое напряжение $\sigma_т = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$. При многократных циклах эти напряжения приводят к усталостному повреждению – термической усталости.

Характерные признаки термической усталости:

- сетка мелких взаимно перпендикулярных трещин на поверхности (так называемая «сетка термической усталости»);
- зарождение трещин в зонах концентрации тепловых потоков (углы, переходы сечений);
- снижение предела выносливости по сравнению с изотермической усталостью в 2–5 раз.

Наиболее подвержены термической усталости материалы с высоким α (алюминий, магний, латуни) и низкой теплопроводностью (аустенитные стали, титан). Типичные примеры разрушений: теплообменники, выхлопные коллекторы двигателей, пресс-формы литья под давлением, футеровка печей.

В монографии по бетонам показано, что при температурно-коррозионных воздействиях (например, в дымовых трубах, на химических производствах) трещиностойкость бетона резко снижается уже после 50–100 циклов нагрев-охлаждение в интервале 20–200 °C. Это объясняется разностью коэффициентов расширения цементного камня и заполнителя, а также фазовыми превращениями воды в порах.

Методы повышения термической усталостной прочности:

- снижение ΔT путём плавных пусков и остановов;
- применение материалов с низким α (инвар, керамика);
- введение компенсаторов теплового расширения (сильфоны, упругие элементы);
- поверхностное упрочнение (обкатка роликами, дробеструйная обработка), создающее сжимающие остаточные напряжения.

Особенности поведения наноматериалов и композитов. Нанокристаллические и наноструктурированные материалы (с размером зёрен менее 100 нм) проявляют уникальные температурные зависимости. Как отмечают Андриевский и Глезер, прочность наноструктур при комнатной температуре может в 5–10 раз превышать прочность крупнозернистых аналогов, но эта сверхпрочность быстро падает с нагревом [2, с. 341]. Причина – активация зернограничного скольжения и диффузионных процессов, которые при малых размерах зёрен начинаются при более низких температурах (порядка 0,2–0,3 $T_{пл}$). Кроме того, наноматериалы склонны к термическому росту зёрен, что безвозвратно ухудшает свойства. Поэтому для высокотемпературных применений нанокристаллические покрытия стабилизируют тугоплавкими добавками (карбидами, нитридами).

Углеродные наноструктуры – фуллерены, нанотрубки, графен – обладают исключительной термической стабильностью. Как описано

Елецким, прочность на растяжение однослойной нанотрубки может достигать 100 ГПа, сохраняясь до температур 2000–2500 °C в вакууме или инертной атмосфере [5, с. 250]. Однако в композитах с металлической или полимерной матрицей интерфейс между нанотрубкой и матрицей часто становится слабым звеном при нагреве. Для арамидных композитов, по данным Макарова и Шванкина, существенное падение прочности наблюдается уже при 200 °C из-за деградации полимерной матрицы [7, с. 24].

В строительстве для многослойных ограждающих конструкций (сэндвич-панели, вентилируемые фасады) важно согласовать коэффициенты теплового расширения слоёв. Разница более чем на $(3–5)\cdot10^{-6}$ K^{-1} приводит к растрескиванию наружного слоя при резких перепадах температур, что подтверждено численными и экспериментальными исследованиями.

Практические рекомендации по выбору материалов и защите от температурных воздействий. На основе изложенных закономерностей можно сформулировать следующие инженерные принципы:

1. **Для низкотемпературной эксплуатации (ниже –40 °C)** – применять аустенитные нержавеющие стали, сплавы на никелевой или алюминиевой основе. Избегать ферритно-перлитных сталей с высоким порогом хладноломкости. Обязательно проводить ударные испытания на образцах с надрезом при минимальной рабочей температуре.
2. **Для высокотемпературной работы (выше 400 °C)** – использовать жаропрочные сплавы с дисперсионным или интерметаллидным упрочнением (Ni–Cr–W–Mo, Co–Cr). Расчёт на ползучесть выполнять по нормативным методикам с запасом по времени до третичной стадии. Для кратковременных высокотемпературных воздействий (например, в ракетных двигателях) могут применяться тугоплавкие металлы (W, Mo, Nb) с защитными покрытиями.
3. **Для защиты от термической усталости** – снижать скорость нагрева/охлаждения, скруглять углы, использовать градиентные материалы (например, керметы), применять компенсаторы температурных деформаций. В бетонных конструкциях – подбирать заполнитель с коэффициентом расширения, близким к цементному камню, и вводить полимерные добавки для повышения трещиностойкости.
4. **Для наноматериалов и композитов** – учитывать, что наноструктуры эффективны при температурах не выше 0,3 T_пл из-за термической нестабильности. Для арамидных и углеродных композитов – ограничивать пиковые температуры ниже температуры стеклования матрицы.
5. **Общие подходы** – использовать термообработку для получения стабильной структуры (отпуск, старение). В ответственных узлах предусматривать системы активного охлаждения или тепловой защиты. При проектировании стержневых систем учитывать температурные напряжения

наряду с силовыми, применяя методы оптимального проектирования с ограничениями по безопасной устойчивости.

Заключение. Температурные воздействия являются мощным фактором, изменяющим механические свойства материалов: от охрупчивания и роста прочности при низких температурах до разупрочнения, ползучести, релаксации и термической усталости при высоких и циклических температурах. Каждый тип материала – металлы, полимеры, керамика, наноструктуры, композиты, бетоны – имеет свою температурную чувствительность, обусловленную особенностями атомной структуры и связей.

Пренебрежение температурными эффектами в расчётах приводит к внезапным хрупким разрушениям (зимой), недопустимым деформациям ползучести (в турбинах и печах), трещинам термической усталости (в теплообменниках). Напротив, грамотный выбор материала с учётом реального температурного диапазона, применение защитных покрытий, компенсаторов и систем охлаждения позволяет обеспечить высокую надёжность и долговечность конструкций, работающих в экстремальных условиях – от космического холода до пламени газовых турбин. Дальнейшее развитие материаловедения направлено на создание мультиматериалов с заданным градиентом свойств и наноструктурированных композитов, сохраняющих прочность и пластичность в широком интервале температур.

Список литературы:

1. Алымов, М. И. Механические свойства нанокристаллических материалов : учеб. пособие / М. И. Алымов ; М-во образования Рос. Федерации, М-во Рос. Федерации по атомной энергии, Моск. инженер.-физ. ин-т (гос. ун-т). – Москва : МИФИ, 2004. – 31 с.
2. Андриевский, Р. А. Прочность наноструктур / Р. А. Андриевский, А. М. Глезер // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179, № 4. – С. 337-358.
3. Елецкий, А. В. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе / А. В. Елецкий // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177, № 3. – С. 233-274.
4. Клюев, С. В. Оптимальное проектирование стержневых систем при силовых и температурных воздействиях с учетом безопасной устойчивости / С. В. Клюев, А. В. Клюев // Фундаментальные исследования. – 2009. – № 1. – С. 30-31.
5. Когаев, В. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность : Справочник / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. – Москва : Научно-техническое издательство "Машиностроение", 1985. – 224 с.
6. Леонович, С. Н. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных коррозионных воздействиях : монография в 2 частях / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский, О. Ю. Чернякевич, А. В. Степанова. Часть 2. – Минск : Белорусский национальный технический университет, 2016. – 204 с. – ISBN 978-985-550-925-8.

7. Макаров, А. Г. Сравнительный анализ физико-механических свойств арамидных материалов / А. Г. Макаров, А. М. Шванкин // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2016. – Т. 31, № 1. – С. 22-27.

8. Ребецкий, Ю. Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов / Ю. Л. Ребецкий. – Москва : Академкнига, 2007. – 406 с. – ISBN 978-5-94628-200-0.

9. Сакмарова, Л. А. Многослойные ограждающие конструкции, и их свойства при температурных воздействиях / Л. А. Сакмарова, М. А. Бахмисова // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции : Материалы IV Международной (X Всероссийской) конференции, Чебоксары, 21–22 ноября 2018 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2018. – С. 88-96.

УДК 621.923

Мишина Ю. В.
Научный руководитель - Янкин Игорь Николаевич,д.т.н., профессор
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Саратов, Россия

СРЕДСТВА РЕГИСТРАЦИИ КОЛЕБАНИЙ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ И ОЦЕНКИ ИХ ВЛИЯНИЯ НА ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ

Аннотация: Статья посвящена анализу современных средств регистрации механических колебаний в зоне резания и оценке их влияния на качественные и количественные характеристики процесса резания. Рассмотрены основные типы датчиков вибрации, методология их применения, роль полученных данных в диагностике состояния режущего инструмента и оптимизации режимов обработки. Исследованы взаимосвязи между амплитудой колебаний, износом инструмента и параметрами обработанной поверхности. Предложены практические подходы к интеграции систем вибромониторинга в технологический процесс для повышения его эффективности и надёжности.
Ключевые слова: колебания, вибрация, регистрация, датчики, акселерометры, зона резания, износ инструмента, диагностика, мониторинг, технологический процесс.

Проблема контроля и анализа механических колебаний в зоне резания остаётся актуальной в машиностроительной отрасли на протяжении нескольких десятилетий. Колебания, возникающие при взаимодействии режущего инструмента с заготовкой, представляют собой сложное физическое явление, обусловленное целым комплексом факторов: нестабильностью сил резания, нарушением геометрии режущей кромки, люфтами в направляющих станка и, в особенности, самовозбуждением колебательной системы станок-приспособление-инструмент-деталь. Почему именно вибрационный контроль занимает приоритетное место в системах технической диагностики? Ответ кроется в том, что колебания являются, по сути, отражением всех происходящих в технологической системе изменений – от градиента температурных полей в зоне резания до начальных признаков разрушения режущей кромки [1, с. 45].

Значимость вибрационного анализа для проектирования и эксплуатации обрабатывающего оборудования обусловлена несколькими факторами. Во-первых, точность обрабатываемых деталей напрямую определяется уровнем механических колебаний станка. Смещение инструмента всего на несколько микрометров вследствие вибраций может привести к браку в партии изделий, требующих высокой точности. Во-вторых, амплитуда и спектральный состав колебаний отражают состояние режущего инструмента – его износ,

образование наростов, а также риск катастрофического отказа. В-третьих, вибрационный мониторинг позволяет оптимизировать режимы резания в реальном времени, снижая потребление энергии и повышая производительность [2, с. 78].

Процесс резания сопровождается генерацией колебаний на различных частотах. Низкочастотные колебания (до 100 Гц) связаны в основном с неравномерностью сил резания и регенеративным эффектом, при котором неровная обработанная поверхность, взаимодействуя с режущей кромкой, вызывает периодические возмущения. Среднечастотные колебания (100–1000 Гц) обусловлены собственными частотами колебаний технологической системы. Высокочастотные колебания (выше 1 кГц) возникают вследствие микропластического деформирования материала заготовки и характеристик взаимодействия трущихся поверхностей инструмента и стружки. Полный спектр этих колебаний несёт информацию о состоянии процесса, и именно поэтому правильный выбор средств регистрации является ключевой задачей [3, с. 180]. Регистрация колебаний в зоне резания осуществляется посредством различных типов датчиков, каждый из которых обладает специфическими характеристиками, определяющими его применимость в конкретной технологической ситуации.

Наиболее распространённым и надёжным методом регистрации вибраций являются пьезоэлектрические акселерометры. Принцип их работы основан на пьезоэлектрическом эффекте: при механическом воздействии пьезоэлектрический кристалл (обычно из керамики или монокристаллического кварца) деформируется и генерирует электрический сигнал, пропорциональный приложенному ускорению. Акселерометры этого типа обладают широким диапазоном частотной характеристики – от 1 Гц до 25 кГц и более, что позволяет захватить весь спектр релевантных для резания колебаний. Чувствительность пьезоэлектрических датчиков составляет обычно 10–100 мВ/g, где g – ускорение свободного падения, что обеспечивает высокую точность измерений даже при малых амплитудах вибраций [4, с. 34].

Однако пьезоэлектрические акселерометры имеют и существенные ограничения. Во-первых, они требуют специального усилителя сигнала и предварительного усиления перед аналого-цифровым преобразованием, что усложняет аппаратуру регистрации. Во-вторых, при монтаже датчика необходимо обеспечить надёжный контакт между базой акселерометра и поверхностью вибрирующей детали, в противном случае качество регистрации резко снижается. В-третьих, само присутствие датчика, имеющего ненулевую массу (обычно 5–50 г), изменяет динамические характеристики технологической системы, что может привести к искажению регистрируемого сигнала. Масса датчика должна быть как минимум в 10–20

раз меньше, чем эффективная масса вибрирующего элемента, чтобы влияние на результаты было пренебрежимо малым.

В последние годы всё большее распространение получают микроэлектромеханические системы (МЭМС) акселерометры. Эти устройства изготавливаются на основе микромеханических структур на кремниевой подложке и обладают рядом преимуществ над пьезоэлектрическими аналогами. МЭМС-акселерометры имеют существенно меньший размер и массу (часто менее 1 г), что уменьшает их влияние на динамику системы. Они обладают более высоким разрешением по амплитуде, часто достигающим 0,01 m/s^2 и лучше, что критично для выявления ранних признаков износа инструмента. Низкий уровень дрейфа и стабильность характеристик при температурных колебаниях делают МЭМС-датчики привлекательными для использования в промышленной среде, где температура в зоне резания может колебаться в широких пределах [5, с. 16].

Характеристики выбираемого датчика должны соответствовать ожидаемым параметрам колебаний. Типичные уровни ускорений при резании составляют 5–50 g при низких частотах и 2–10 g при высоких частотах. Таким образом, предел измерения датчика должен быть выбран с запасом в 20–30 % выше максимально ожидаемого ускорения. Частотная полоса датчика определяется диапазоном частот, релевантных для контроля процесса. Для общей оценки состояния рекомендуется диапазон 10 Гц – 10 кГц, однако для диагностики специфических видов отказов (например, образование наростов на режущей кромке) требуется расширение полосы до 20–25 кГц.

Размещение датчика на технологической системе является критическим моментом, от которого зависит качество регистрации и информативность полученных данных. Оптимальным местом установки акселерометра считается точка, максимально близкая к зоне резания и закреплённая таким образом, чтобы датчик отвечал на составляющие вибрации в радиальном и тангенциальном направлениях относительно оси резания. При обработке деталей на токарном станке датчик обычно крепится на державке режущего инструмента или на корпусе прижимного механизма. При фрезеровании датчик располагают на боку шпинделя или на консоли станка. При обработке на многоцелевых станках часто устанавливают несколько датчиков по трём координатным осям для полного описания вибрационного состояния.

Монтаж датчика производится несколькими способами. Постоянное винтовое крепление обеспечивает наиболее надёжный контакт и используется в лабораторных условиях. Магнитное крепление удобно для мобильной диагностики, однако его применение ограничено при больших ускорениях. Клеевое крепление на двусторонний скотч или специальный полимерный клей позволяет быстро устанавливать и снимать датчик, но требует предварительной подготовки поверхности и может быть ненадёжным при

интенсивных вибрациях и нагреве. В технологической практике наиболее распространённым является крепление с помощью специального стержня, вставляемого в подготовленное отверстие на детали контроля.

После регистрации сигналов вибрации необходимо их предварительная обработка и анализ. Сырые данные, поступающие с датчика, представляют собой временной ряд ускорений с частотой дискретизации, обычно выбираемой в диапазоне 5–50 кГц в зависимости от требуемой частотной полосы.

Для выявления характерных признаков состояния процесса применяют спектральный анализ с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ), которое преобразует сигнал из временной области в частотную. При анализе спектра мощности вибрации внимание уделяется следующим характеристикам: общему уровню вибрации (интегралу спектра по всему диапазону частот), амплитудам пиков на частотах собственных колебаний системы, наличию гармоник и боковых полос, которые указывают на модуляцию сигнала [6, с. 313].

Огибающая спектра, или высокочастотное ускоренное огибающее спектра (High-Frequency Envelope Spectrum, HFES), является весьма информативной характеристикой для диагностики начальных стадий отказа инструмента. Этот метод предполагает фильтрацию сигнала в высокочастотной области (обычно 2–25 кГц), детектирование амплитуды огибающей и последующее БПФ. Таким образом выявляются низкочастотные модуляции высокочастотных составляющих, которые часто указывают на развитие дефектов режущей кромки раньше, чем они проявятся в общем спектре вибрации.

Корреляция между уровнем вибрации и состоянием режущего инструмента является нелинейной и зависит от множества факторов. На начальном этапе работы острого инструмента вибрации минимальны и отражают лишь собственные шумы технологической системы. По мере накопления износа и образования площадки износа на задней поверхности режущей кромки вибрации постепенно возрастают. Однако это возрастание идёт медленно и скрывается в общем уровне вибрации. Критическое значение наступает тогда, когда площадка износа достигает размера 0,5–1,0 мм, и в этой момент вибрационная активность может скачкообразно возрасти. Дальнейшее развитие отказа может сопровождаться либо монотонным возрастанием вибраций, либо, наоборот, их скачкообразным снижением при расслоении режущей кромки и отколе части инструмента.

Одним из наиболее опасных явлений в процессе резания является самовозбуждение колебаний, называемое дребезгом или чаттерингом. Это явление возникает в результате взаимодействия между вибрирующей режущей кромкой и обработанной поверхностью: неровности на

обработанной поверхности, волнистость с периодом, соответствующим половине длины волны собственного колебания системы, вызывают новые возмущения, которые синхронизируются с собственными колебаниями технологической системы. Результатом является экспоненциальный рост амплитуды колебаний, который может привести к разрушению инструмента за считаные секунды. Вибрационный мониторинг позволяет выявить начало этого процесса по скачкообразному изменению спектра вибрации, появлению боковых полос вокруг основных частот колебаний и резкому возрастанию дисперсии сигнала [7, с. 212].

Влияние вибраций на качество обработанной поверхности является непосредственным. При наличии колебаний с амплитудой несколько микрометров режущая кромка оставляет волнистый след на поверхности, что приводит к возникновению виброотпечатков. Волнистость поверхности может быть количественно оценена через параметр Wa (волнистость в мкм), и экспериментальные данные показывают, что при колебаниях с амплитудой 10 мкм волнистость обработанной поверхности возрастает примерно в 5–10 раз. Кроме того, локальные пики напряжений в материале при вибрациях приводят к микропластическому деформированию, которое создаёт остаточные напряжения в поверхностном слое детали. Это может ускорить зарождение трещин при эксплуатации деталей в условиях циклического нагружения.

Вибрационные колебания также влияют на образование стружки и на процессы в зоне резания. При интенсивных вибрациях прерывистый характер резания приводит к периодическому изменению толщины срезаемого слоя, что вызывает соответствующие колебания сил резания. Эти колебания сил, в свою очередь, являются источником дополнительных вибраций технологической системы, создавая положительную обратную связь. Измерения температуры в зоне резания при наличии вибраций показывают, что в области непосредственного контакта инструмента и стружки формируются локальные перегревы до 700–800 °C, в то время как в отсутствие вибраций температура составляет около 600 °C при тех же режимах обработки. Эти локальные перегревы значительно ускоряют диффузионный износ инструмента, особенно при обработке сталей и чугуна. Результатом является снижение стойкости инструмента – при наличии вибраций с амплитудой 20–30 мкм стойкость инструмента может сократиться на 30–50 % по сравнению с благоприятными условиями обработки.

Интегрированные системы мониторинга состояния технологических станков в реальном времени становятся всё более распространёнными на современных предприятиях. Такие системы обычно включают в себя массив акселерометров, встроенных в различные точки станка, управляющий компьютер с программным обеспечением для обработки сигналов, а также интерфейсы для связи со станком и системой управления. Основная идея

състоит в том, чтобы постоянно мониторить вибрационное состояние оборудования и, при обнаружении отклонений от установленных норм, выдавать предупреждения оператору или автоматически корректировать режимы обработки [8, с. 110].

Существуют несколько подходов к интерпретации данных вибрационного мониторинга. Наиболее простой – это сравнение текущего уровня вибрации с установленным лимитом. Однако этот подход игнорирует информацию о спектральном составе вибрации и не позволяет различать различные типы неисправностей. Более продвинутые методы основаны на анализе трендов – прослеживание того, как изменяются со временем различные параметры вибрации (общий уровень, амплитуды на характерных частотах, энергия в определённых полосах). Критические пороги определяются не абсолютными значениями, а скоростью изменения параметров. Например, если энергия вибрации в полосе 1–5 кГц возрастает более чем на 5 % в день, это может указывать на развивающийся процесс износа, требующий внимания.

Машинное обучение и искусственные нейронные сети всё чаще применяются для классификации состояний технологической системы по вибрационным данным. На этапе обучения системе предоставляются примеры вибрационных сигналов, соответствующих различным состояниям: нормальное функционирование, начинающийся износ инструмента, развитый износ, дребезг, попадание стружки в зону резания и т.д. Нейронная сеть учится распознавать характерные признаки каждого состояния в пространстве признаков, построенном на основе временных, частотных и энергетических параметров сигнала. После обучения система может в реальном времени предсказывать состояние технологического процесса и выдавать специфические рекомендации по коррекции режимов [9, с. 685].

Несмотря на очевидные преимущества систем вибромониторинга, следует признать наличие существенных проблем и ограничений в их практическом применении. Во-первых, стоимость оборудования и программного обеспечения остаётся высокой, особенно для малых и средних предприятий. Во-вторых, внедрение таких систем требует обучения персонала, что часто встречает сопротивление со стороны операторов и мастеров, привыкших к традиционным методам контроля. В-третьих, система вибромониторинга даёт наиболее эффективные результаты при условии, что характеристики техпроцесса заранее хорошо изучены, и для каждого сочетания режимов обработки установлены критические пороги вибрации. На практике это требует проведения предварительных исследований, которые отнимают время и ресурсы.

Кроме того, существует фундаментальная проблема, связанная с интерпретацией вибрационных сигналов. Один и тот же уровень вибрации

може быть следствием совершенно различных причин: износа инструмента, люфта в подшипниках, дисбаланса шпинделя, попадания стружки и т.д. Без дополнительной информации о техническом состоянии оборудования, истории обслуживания и текущих режимах обработки невозможно однозначно установить причину возникших колебаний. Следовательно, система вибромониторинга не может рассматриваться как автономное диагностическое средство, а только как один из компонентов комплексной системы технического контроля и диагностики.

Практическое применение вибрационного контроля также осложняется вариативностью условий в производстве. Вибрационные характеристики одного и того же технологического процесса могут существенно отличаться в зависимости от геометрии заготовки, её жёсткости, материала, состояния приспособления, степени выработки направляющих станка. Это означает, что пороги вибрации, установленные для одного условия обработки, могут быть неприменимы для другого. Требуется непрерывная адаптация алгоритмов диагностики к текущим условиям, что требует от системы значительной вычислительной мощности и гибкого программного обеспечения.

При проектировании и установке систем регистрации вибрации необходимо учитывать также влияние внешних электромагнитных помех и шумов в измерительной цепи. Силовое оборудование станка, частотные преобразователи, системы подачи охлаждающей жидкости – всё это может генерировать электромагнитные помехи, которые будут восприняты датчиком и исказят результаты измерения. Решение этой проблемы требует экранирования кабелей, использования дифференциальных усилителей и, в некоторых случаях, цифровой фильтрации сигналов. Современные системы мониторинга предусматривают встроенные фильтры шумов, но качество фильтрации зависит от уровня информационной подготовленности персонала, обслуживающего оборудование.

Эффективное использование данных о вибрациях возможно лишь при условии интеграции вибрационной информации с другими параметрами технологического процесса: силами резания, температурой в зоне резания, расходом охлаждающей жидкости, требуемой степенью шероховатости. На современных производствах всё более внедряются интегрированные системы сбора данных (АСУТП), в которых информация от датчиков различных типов консолидируется в единой базе данных. Такой подход позволяет строить многопараметрические модели состояния технологического процесса и принимать обоснованные решения о коррекции режимов. Например, при обнаружении повышенной вибрации и одновременно возросшей температуры в зоне резания логичным будет предположение об интенсивном износе инструмента, и соответствующая рекомендация будет направлена на замену инструмента или снижение скорости резания.

Перспективным направлением развития техники регистрации вибраций является применение оптических датчиков на основе лазерной интерферометрии и голографии. Такие датчики позволяют бесконтактно регистрировать смещения и колебания объектов без механического воздействия на систему. Однако в настоящее время их применение ограничено высокой стоимостью, сложностью юстировки в условиях производства и невозможностью использования при наличии вибрирующих непрозрачных экранов. Вероятно, эти методы будут иметь применение в лабораторных исследованиях и при разработке высокопроизводительных станков, но не станут массовым решением в ближайшие 5–10 лет.

Заключительный аспект рассмотрения – это правовая и нормативная база применения вибрационного контроля. В Российской Федерации действуют государственные стандарты, регламентирующие методы измерения и оценки вибрации. ГОСТ Р 72040.1-2025 устанавливает общие положения по измерению вибрации оборудования, включая производство машин и механизмов. ГОСТ Р ИСО 20816-3-2023 определяет нормы вибрации для различных классов машин и оборудования. Требование к применению вибрационной диагностики в целях профилактического обслуживания основано на международных стандартах ISO 10816 и ISO 20816, которые регулярно обновляются с учётом развития техники и накопленного опыта [10].

Таким образом, средства регистрации колебаний в зоне резания являются неотъемлемой частью современной системы технического контроля и диагностики технологических процессов. Пьезоэлектрические и МЭМС-акселерометры обеспечивают надёжную регистрацию вибраций в широком диапазоне частот и амплитуд. Спектральный анализ и методы обработки сигналов позволяют извлекать информацию о состоянии режущего инструмента и динамических характеристиках технологической системы. Интегрированные системы мониторинга в реальном времени предоставляют средства для своевременного выявления отклонений и оптимизации режимов обработки.

Однако в условиях производства применение вибрационного контроля требует комплексного подхода, интеграции с другими методами диагностики, и постоянного совершенствования алгоритмов анализа данных. Продолжающееся развитие способов регистрации и обработки вибрационной информации открывает новые возможности для повышения качества и производительности технологических процессов в машиностроении.

Список литературы:

1. Григорьев С. Н. Диагностика автоматизированного производства / С. Н. Григорьев, В. Д. Гурин, М. П. Вороненко. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 288 с.

2. Investigation of the Information Possibilities of the Parameters of Vibroacoustic Signals Accompanying the Processing of Materials by Concentrated Energy Flows / [A. A. Akhmetov et al.] // Sensors. — 2023. — Vol. 23, no. 2. — P. 750. — URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36679551/.

3. Янчич, В. В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры): монография / Янчич В.В. - Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2010. - 304 с.ISBN 978-5-9275-0728-3. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/551154 (дата обращения: 16.05.2026). – Режим доступа: по подписке.

4. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден; пер. с англ. Ю. А. Заболотной; под ред. Е.Л. Свинцова. — Москва: Техносфера, 2006. — 592 с. — (Мир электроники). — ISBN 5-94836-050-4. — URL: https://www.rlocman.ru/book/book.html?di=30993 (дата обращения: 10.06.2026).

5. Алейников Д.П. Использование МЭМС-акселерометров для вибромониторинга механообрабатывающих центров / Д.П. Алейников, А.В. Лукьянов, П.Н. Костин // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 2 (62). – С. 14-20. – DOI: 10.18324/2077-5415-2024-2-14-20

6. Влияние скорости резания на импульсные изменения температуры передней поверхности резца при точении жаропрочной стали 15Х2НМФА / В.Е. Гвинджилия, Е.В. Фоминов, А.А. Марченко, Т.В. Лавренова, С.А. Дебеева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 23–36. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-23-36.

7. Контроль параметров процесса резания на основе диагностирования инструмента и заготовки / С. Н. Григорьев [и др.]. - (Линейные и угловые измерения). - Текст : непосредственный // Измерительная техника. - 2012. - № 5. - С. 46-48. - ISSN 0368-1025.

8. Петрухин, В. В. Вибрация, вибродиагностика и … ЭЦН : монография / В. В. Петрухин, С. В. Петрухин. — Москва : Русайнс, 2022. — 184 с. — ISBN 978-5-466-01822-6. — URL: https://book.ru/book/947171

9. Панин Е.П. Прогнозирование технического состояния оборудования на основе ансамблевых методов машинного обучения // Вестник науки. – 2025. – № 6 (87), т. 5, ч. 1. – С. 683–689.

10. ГОСТ Р 72040.1-2025. Вибрация. Измерения вибрации и оценка её воздействия на машины. Общие положения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://docs.cntd.ru/document/1300374275 (дата обращения: 07.05.2026).

АРХИТЕКТУРА И ДИЗАЙН

УДК 694:691.11

Келехсашвили Р. Д., Колодин К. И.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

АДАПТАЦИЯ ДЕРЕВА КАК СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЗАСТРОЙКИ В РОССИИ

Аннотация. Данное исследование посвящено адаптации дерева, в основе CLT-панелей в российском строительстве. Был проанализирован мировой опыт проектирования и строительства многоэтажных жилых и общественных зданий. Продемонстрировано, что до недавнего времени развитие отрасли в России сдерживалось нормативными нестыковками. С выходом СП 549.1311500.2026 данный конфликт был устранен, легализовав высотное деревянное домостроение и задав параметры противопожарной защиты. Сделан вывод о соответствии отечественных технологий мировым стандартам при условии развития производственных мощностей и перехода к расчетным методикам огнестойкости. Смысл статьи – предложить, как адаптировать дерево в городе для застройки зданий и качественно перенести дерево из загородного строительства в городскую застройку.

Ключевые слова: деревянная архитектура, многоэтажное строительство, мировой опыт, технологические особенности, CLT-панели.

1. Актуальность.

Российский опыт строительства с использованием дерева как конструктивного материала имеет глубокие исторические корни. Дерево на Руси представляло из себя как доступный строительный материал, так и основу национальной культуры, которая определила облик русских поселений на многие столетия [1]. По историческим данным, обширные лесные массивы в сочетании с суровым климатом сделали древесину практически незаменимой в домостроении. Материал обладал низкой теплопроводностью и легко обрабатывался. Здания зачастую строились без единого гвоздя. Со временем, плотники научились лучше обращаться с материалом и от простых изб зодчие стали создавать усадьбы, особняки и храмы, формируя уникальную архитектурную идентичность. Однако длительный период индустриализации выявил приоритет таких материалов как бетон, металл и кирпич, что привело к тому, что дерево, как конструктивный материал, в строительном сообществе стал считаться материалом, пригодным исключительно в малоэтажном загородном строительстве. Тем не менее, последние тенденции проектирования и строительства демонстрируют возрождение дерева как архитектурного и технологического материала.

Наблюдая за российской ситуацией, можно заметить значительное расхождение между теоретическим потенциалом и практической реализацией. С одной стороны, Россия располагает колоссальными лесными ресурсами. По данным Государственного Лесного Реестра, площадь земель лесного фонда страны на 2025 год составляет 832 млн. га, что составляет 20% от лесов всей планеты [2]. С другой стороны, доля деревянных многоквартирных и общественных зданий в России значительно меньше, чем в скандинавских странах. Подобная ситуация объясняется рядом причин, среди которых следует выделить нормативные ограничения, производственные сложности, а также «тоннельное зрение» российского профессионального сообщества.

Однако, в последние годы в данном направлении была замечена положительная динамика. В 2019 году были введены своды правил СП 451.1325800.2019 [3] и СП 452.1325800.2019 [4], которые впервые разрешили проектирование общественных и жилых зданий с применением деревянных конструкций высотой до 28 метров, что соответствует примерно 9 этажам. Это стало прорывом, поскольку ранее высота деревянных зданий ограничивалась 3 этажами. Также особую актуальность данной статьи подтверждает вышедший 1 апреля 2026 года СП 549.1311500.2026 [5], разработанный Минстроем России совместно с МЧС. Данный СП является сводом правил по пожарной безопасности в многоквартирном деревянном строительстве, что позволяет безопасно строить и вводить в эксплуатацию подобные здания.

2. Сравнение международного опыта с российским.

Нео-деревенский стиль в данной статье подразумевает собой современные строения из деревянных конструктивных и отделочных материалов.

В зарубежной практике феномен «нео-деревенского стиля» не ориентируется на ретроспективные течения. Речь идет не о воспроизведении декоративных элементов народного зодчества, а о переосмыслении древесины как высокотехнологичного конструктивного материала, способного конкурировать с железобетоном и сталью в сегменте многоэтажного жилого и общественного строительства. Основой для данного переосмысления является создание перекрестно-клееных панелей - CLT. Данную технологию разработали в Австрии и Германии в 1990-х годах [6]. Она позволяет создавать крупноформатные панели толщиной до 500 мм в основном из хвойных высушенных пород древесины. Данные панели обладают несущей способностью, сопоставимой с железобетонными плитами, при значительно меньшем весе.

С теоретической точки зрения возникает существенная разница между бревенчатым или брусчатым домостроением и строительством с использованием CLT-панелей. Первое подразумевает строительство из штучных материалов, обрабатываемым непосредственно на строительной

площадке, тогда как второе – продукт заводской готовности. Это позволяет значительно ускорить строительство, а также создавать BIM-модели и точно рассчитывать конструкции. Именно эта индустриализация составляет подлинное содержание «нео-деревенского» стиля.

Российская практика представляет нам жилой комплекс «Соколики» [7] в Вологодской области, включающий два четырехэтажных дома из CLT-панелей (рисунок 1). Реализацией проекта занялась компания «Segezha Group». Благодаря ей проект прошел все необходимые согласования. Показательно, что огневые испытания, проведенные совместно с МЧС, продемонстрировали высокий предел огнестойкости конструкций, что подтверждает корректность расчетных методов.

Первый в России многоквартирный жилой комплекс из CLT-панелей.

Рисунок 1 – Визуализация жилого комплекса «Соколики».
https://optim.tildacdn.com/tild3265-3239-4430-a463-393039303662/-/format/webp/image_154599.jpg.webp

Так или иначе, если сравнивать ситуацию в России и в мире, можно заметить закономерность, что в РФ более строгие противопожарные нормативы по сравнению со странами Европы и Северной Америки, однако количество пожаров в деревянных зданиях остается высоким. Данную статистику можно наблюдать по причине того, что подавляющее большинство этих пожаров приходится на ветхий малоэтажный жилой фонд с печным отоплением и нарушением правил эксплуатации. Мировой опыт же показывает, что в таких странах как Норвегия, Германия и Австрия, где применяется технология CLT-панелей, доля пожаров значительно ниже. Данный контраст демонстрирует, что недостатки материала здесь ни при чем, все упирается в необходимость повышения качества строительства и эксплуатации.

3. Технологические, экологические и экономические параметры применения CLT в строительстве.

Основным технологическим прорывом в деревянном строительстве со времен клееного бруса стали CLT-панели, упоминаемые ранее. Панели

изготавливаются путем склеивания под прессом нескольких слоев пиломатериалов, ориентированных перпендикулярно друг другу. Преимущества данных панелей заключается в нескольких аспектах: возможность строить во всех климатических поясах России; скорость строительства дома из CLT-панелей превышает в 2,5 раза скорость строительства по технологии ЖБИ; данные конструкции примерно в 5 раз легче бетонных и отличаются высокой прочностью и огнестойкостью [8].

Отдельного рассмотрения заслуживает экологический аспект деревянного строительства. Из всех конструктивных материалов, древесина является единственным возобновляемым, причем ее использование способствует депонированию углерода на весь срок службы здания. Так как Россия занимает лидирующие позиции в мире по площади лесов, строительство из данного материала значительно бы снизило количество выброса углекислого газа.

Экономический аспект внедрения CLT-технологий нельзя назвать однозначным. С одной стороны, заводское изготовление панелей и высокая скорость монтажа позволяет сократить сроки строительства и уменьшить долю ручного труда. С другой стороны, стоимость подобных панелей в России выше, чем в Европе, что связано с недостаточной загрузкой производственных мощностей и необходимостью импорта некоторых компонентов. Несмотря на это, мы можем наблюдать положительную динамику в данном вопросе. В 2025 году планировалось увеличить выпуск CLT-панелей, в том числе за счет развития префаб-технологий, предполагающих высокую заводскую готовность домовых комплектов. Помимо этого, появление сметных норм на монтаж CLT-конструкций позволяет точно определить стоимость строительства и с большей легкостью проходить экспертизу, поскольку ранее проектировщики были вынуждены работать через индивидуальные расценки и аналоги.

4. Разбор международных аналогов для адаптации к российскому строительству.

Для оценки перспектив деревянного строительства в России необходимо обратиться к мировому опыту:

1. Башня Mjøstårnet, Брумунндал, Норвегия, 2019 [9].

Здание является многофункциональным 18-этажным центром, высотой 85,4 м. Конструктивная составляющая сделана полностью из клееного бруса и CLT-панелей (рисунок 2).

Здание, в котором сочетаются CLT-панели с несущими фермами из клеёного бруса и бетонными плитами на верхних этажах. Сверху выступают декоративные фермы из

Рисунок 2 – Фотография башни Mjøstårnet.
https://cdn.vdmsti.ru/image/2023/7u/18sb6f/fullscreen-1m1j.jpg

2. HoHo Wien, Вена, Австрия, 2019 [10].

Данный многофункциональный центр имеет больше этажей, а именно 24, однако его высота немного ниже предыдущего - 84 метра (рис. 3). В здании бетонное ядро жесткости, комбинирующееся с деревянными несущими элементами. Важно отметить, что данные проекты прошли полный цикл сертификации, включая испытания на огнестойкость, сейсмостойкость и ветровые нагрузки.

Здание внутри содержит железобетонные конструкции, однако фасадная часть полностью выполнена из CLT-панелей

Рисунок 3 – Фотография HoHo Wien
https://i.pinimg.com/1200x/cf/00/73/cf0073356f7b69660729c7112befc16c.jpg

3. Международный аэропорт Гелепху, Индия, 2029 [11].

Данное здание будет построено в 2029 году, однако даже сейчас можем видеть разнообразие и масштаб проектов, которые можно выполнять из деревянных конструкций. Терминал планируется выстроить из клееного бруса и покрыть традиционной резьбой силами местных мастеров (рисунок 4).

Здание построено по модульной сетке из клееного бруса, которая влияет на пространственную организацию здания.

Рисунок 4 – Визуализация терминала аэропорта.
https://i.archi.ru/i/752_501/462197.jpg

Сравнительный анализ нормативных баз показывает, что зарубежный подход подразумевает использование расчетного подхода к оценке огнестойкости, в то время как российский ориентирован на более консервативные критерии. В Европе это нормируется Eurocode 5, и этот подход закреплен несколько десятилетий, в то время как Российские СП только формируются в этом направлении.

Однако не стоит полагать, что мировой опыт может быть механически применен в РФ. Различия в климатических условиях, в сейсмической активности отдельных регионов, в структуре лесопользования, и в системе сертификации требуют адаптации. Тем не менее, тенденция очевидна – возродить дерево как конструктивный и отделочный материал.

Выводы.

1) Отсылая к исторической составляющей, можно сделать вывод, что Россия подошла к эпохе современных технологий, обладая не только ресурсами, но и уникальным культурным кодом работы с деревом. Следовательно, внедрение CLT-технологий является закономерным развитием исконной традиции к деревянному материалу в строительстве.

2) Проанализировав современную практику, можно прийти к выводу о том, что в России деревянное многоэтажное домостроительство не практиковалось не из-за отсутствия материалов или технологий, а из-за нормативного консерватизма. Выход СП 549.1311500.2026 снимает последние системные ограничения. Это значит, что в ближайшие несколько лет начнется формирование нового сегмента строительного рынка.

3) Проанализировав технологический, экономический и экологические аспекты, выяснилось, что CLT-панели являются зрелой и готовой к масштабному применению технологией, однако ее экономическая эффективность в российских условиях напрямую зависит от налаживания производственной составляющей. Так как у дерева есть экологическое преимущество в виде депонирования углерода, в настоящее время не может

быть в полной мере сертифицировано по международным стандартам, что снижает инвестиционную привлекательность для «зеленых» инвесторов. Таким образом, экологический потенциал останется лишь декларацией без решения проблемы лесной сертификации.

4) Зарубежный опыт показывает, что многоэтажные деревянные здания безопасны и долговечны. Вместе с тем очевидно, что прямое копирование международных нормативных решений невозможно из-за разницы в климатических и сейсмических условиях.

Заключение.

Подводя итоги, можно сказать, что конструктивная основа «нео-деревенского» стиля предполагает активное развитие в России. Зарубежный опыт показывает возможность многоэтажного деревянного строительства, что также применимо для России. Российская нормативная база в последние годы претерпевает значительные изменения. Появляются первые реализованные проекты, формируется производственная инфраструктура, разрабатываются сметные нормы. Проблемами же являются отсутствие сертифицированного леса и недостаточная загрузка производственных мощностей. Несмотря на это, направление имеет большой потенциал для развития в России.

Благодаря нововведенным нормативам, строительство из CLT-панелей и клееного бруса возможно в различных конфигурациях: от малоэтажных блокированных жилых домов и таунхаусов до многоквартирных комплексов высотой до девяти этажей. В сегменте общественных зданий дерево позволяет реализовывать школы, детские сады, спортивные центры, библиотеки и административные учреждения. Причем конструктивная составляющая может быть как полностью состоящей из дерева, так и гибридной, сочетающей CLT-панели с железобетонными или стальными элементами.

Что касается стиля и формообразования, нео-деревенская архитектура не накладывает жестких стилистических ограничений. Технология позволяет создавать как лаконичные объемы в духе минимализма с открытыми деревянными поверхностями, так параметрические формы, достигаемые за счет гнутоклееных конструкций и многогранных CLT-панелей. Таким образом, дерево становится полноценной альтернативой бетону и металлу, способной удовлетворить самые разнообразные архитектурные запросы.

Список литературы:

1. Деревянное зодчество // Этномир : сайт. – URL: https://ethnomir.ru/articles/derevyannoe-zodchestvo / (дата обращения: 06.04.2026).

2. Россия сохраняет крупнейший лесной фонд в мире: новые данные ФАО о глобальных лесных ресурсах // Организация Объединенных Наций : сайт. – 2025. – URL: https://news.un.org/ru/story/2025/10/1466656 (дата обращения: 02.04.2026).

3. СП 451.1325800.2019. Здания общественные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования: свод правил : утвержден приказом Минстроя

России от 22.10.2019 № 643/пр. – URL: https://internet-law.ru/documents/prod/pravila/0/sp_71655.html (дата обращения: 02.04.2026).

4. СП 452.1325800.2019. Здания жилые многоквартирные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования: свод правил : утвержден приказом Минстроя России от 28.10.2019 № 651/пр. – URL: https://base.garant.ru/73733758/ (дата обращения: 02.04.2026).

5. Утвержден СП 549.1311500.2026 на деревянные многоквартирные жилые дома // Учебный центр «Такир» : сайт. – URL: https://takir.ru/vse-publikacii/novosti/utverzhden-sp-549-1311500-2026-na-derevjannye-mnogokvartirnye-zhilye-doma/ (дата обращения: 02.04.2026).

6. Karacabeyli E., Douglas B. CLT Handbook: Cross-Laminated Timber. – Québec : FPInnovations, 2013. – 572 p. ISBN 978-0-86488-544-9.

7. Жилой комплекс «Соколики» // CLT Development: сайт. – URL: https://cltdevelopment.ru/arhitekturnoe-bureau/tproduct/1411038631-358757817652-zhiloi-kompleks-sokoliki (дата обращения: 02.04.2026).

8. АФК «Система» провела бизнес-завтрак на тему деревянного домостроения // РБК Компании: сайт. – URL: https://companies.rbc.ru/news/tDUbewCoEE/afk-sistema-provela-biznes-zavtrak-na-temu-derevyannogo-domostroeniya/ (дата обращения: 03.04.2026).

9. Башня Mjøstårnet // Archi.ru: сайт. – URL: https://archi.ru/projects/world/15587/bashnya-mjstrnet (дата обращения: 03.04.2026).

10. Zukunft aus Holz – Mitten in Wien // HoHo Wien: сайт. – URL: https://www.hoho-wien.at/ (дата обращения: 03.04.2026).

11. На пути к осознанности // Archi.ru: сайт. – URL: https://archi.ru/world/100735/na-puti-k-osoznannosti (дата обращения: 03.04.2026).

УДК 725.515

Загнетина Л. Д., Бойцова Д. В.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕЧЕБНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация: Лечебно-оздоровительные комплексы занимают важное место в системе здравоохранения и социального обеспечения в России. Их значимость обусловлена сочетанием профилактических, лечебных и реабилитационных функций, направленных на поддержание и укрепление здоровья населения. В условиях роста числа хронических заболеваний, ухудшения экологической обстановки и увеличения уровня стресса в современной жизни лечебно-оздоровительные комплексы становятся неотъемлемой частью в обеспечении здоровья людей. Необходимость проектирования современных лечебно-оздоровительных комплексов обусловлена не только социально-экономической значимостью, но и большим потенциалом развития уникальных регионов Российской Федерации.

В статье рассматриваются принципы формирования функционально-планировочной структуры лечебно-оздоровительных комплексов.

Ключевые слова: лечебно-оздоровительный комплекс, оздоровительный туризм, лечебный туризм, функционально-планировочная структура, лечебный курорт.

Введение.

Лечебно-оздоровительные комплексы являются отдельным направлением в современной системе здравоохранения [1]. Они ориентированы не на лечение конкретного заболевания, а на поддержание здоровья через профилактику, восстановление и реабилитацию. В последние годы повысился спрос на создание проектов лечебно-оздоровительных комплексов. Это связано с распространением хронических заболеваний, повышением уровня стресса и ухудшения экологической обстановки в стране. Люди стали осознаннее подходить к вопросам своего здоровья [2].

Лечебно-оздоровительный туризм входит в число наиболее динамично развивающихся направлений туристической отрасли. Россия располагает уникальной природной базой: минеральные источники, лечебные грязи, горный и лесной климат. Исторически природные источники являются основой для реализации на территории санаторно-курортной деятельности.

Благодаря развитию оздоровительного туризма в регионах создаются новые рабочие места, повышается инвестиционная привлекательность,

появляются возможности для привлечения пациентов, в том числе иностранных [3].

В мировом масштабе лечебно-оздоровительный туризм относится к числу наиболее динамично развивающихся направлений туристской отрасли [4]. Согласно прогнозу Всемирной организации здравоохранения (WHO), к 2022 г. туризм совместно со сферой здравоохранения станет одним из наиболее приоритетных направлений развития национальных экономик [4, 5].

Лечебно-оздоровительный туризм существует с античных времен. Известно, что в Древней Греции и Древнем Риме были бани, гостевые дома, школы оздоровительной гимнастики и др. На территории многих современных стран до сих пор сохраняются руины древних римских терм, которые располагались в основном вблизи минеральных источников [4].

Лечебно-оздоровительный туризм представляет собой посещение курортов в лечебно- профилактических целях как резидентами, так и нерезидентами страны на срок от 24 часов до 6 месяцев, последнее согласуется с положениями Федерального закона «Об основах туристской деятельности Российской Федерации» [4, 6].

Качество функционирования лечебно-оздоровительного объекта во многом определяется архитектурными решениями, принятыми на стадии проектирования. Комплекс должен отвечать требованиям медицинской инфраструктуры, обеспечивать комфортную среду пребывания и соответствовать принципам экологической устойчивости. Грамотная освоение территорий проектирования позволяет рационально использовать ее ресурсы и повышать эффективность лечебно-оздоровительных услуг.

Целью данного исследования является определение основных принципов формирования функционально-планировочной структуры современных лечебно-оздоровительных комплексов на примере зарубежного и отечественного опыта. Для этого необходимо рассмотреть лечебно-оздоровительные комплексы с точки зрения их географического размещения, соотношения функциональных зон, технико-экономических показателей.

Принципы формирования современных лечебно-оздоровительных комплексов

Современные лечебно-оздоровительные комплексы представляют собой многофункциональные учреждения, которые выполняют профилактические, лечебные, реабилитационные и рекреационные функции.

Медицинское учреждение Йозефхоф

Лечебно-оздоровительный центр Йозефхоф, спроектированный архитектурным бюро Dietger Wissounig Architekten, расположен в городе Грац, Австрия. Комплекс был построен в 2019 году. Комплекс занимает площадь около 13500 квадратных метров. Проект включает три узких вытянутых объема, органично вписанных в природный ландшафт. Такое расположение

позволяет строениям как «парить» над землёй, так и интегрироваться в рельеф, обеспечивая непрерывное взаимодействие с горной средой [7]. Общая площадь комплекса: 13500 м². Перечень основных функциональных зон: ресепшен, ресторан, медицинский центр, спа-центр с бассейном, фитнес-центр, номерной фонд.

Рисунок 1 – Лечебно-оздоровительный центр Йозефхоф, общий вид, план 1-го этажа

Медицинский центр Бад-Шаллербах

Медицинский центр Бад-Шаллербах, разработанный бюро Architects Collective ZT-GmbH, расположен в парковой зоне вдоль реки Траттнах в Австрии. Комплекс, завершен в 2013 году, он сочетает медицинские и курортные функции, создавая среду для оздоровления и восстановления. Проект выполнен с акцентом на энергоэффективность и экологичность, что отражается в применении натуральных материалов и интеграции в природный ландшафт [8]. Общая площадь комплекса: 10200 м². Перечень основных функциональных зон: Ресепшен, ресторан-столовая, медицинский центр, спа-центр, бассейн, реабилитационный центр, номерной фонд на 124 номера.

Рисунок 2 – Медицинский центр Бад-Шаллербах, общий вид, план 1-го этажа

Медицинский Центр Лансерхоф Зюльт

Медицинский Центр Лансерхоф Зюльт, спроектирован бюро Ingenhoven Associates, расположен на острове Зюльт в Германии. Комплекс включает основное здание с медицинским спа-центром, диагностический корпус и три пляжных дома. Архитектура вдохновлена традиционными фризскими домами с низкими скатными крышами, что обеспечивает гармоничное сочетание с окружающим ландшафтом [9]. Общая площадь комплекса: 16304 м².

Перечень основных функциональных зон: ресепшен, ресторан, медицинский центр, спа-центр с клиникой, фитнес-центр, скалодром, реабилитационный центр, номерной фонд на 55 номеров.

Рисунок 3 – Медицинский Центр Лансерхоф Зюльт отель, общий вид, генеральный план

Дворец Шено Веггис Health Wellness отель

Дворец Шено Веггис Health Wellness отель—оздоровительный центр, расположенный на берегу Фирвальдштетского озера в Швейцарии, недалеко от Люцерна. Открытый в 2020 году, он специализируется на предоставлении медицинских и оздоровительных услуг с использованием методик детоксикации, регенерации и повышения жизненного тонуса [10]. Общая площадь комплекса: 18361 м².

Перечень основных функциональных зон: ресепшен, ресторан, лаунж-зона, медицинский спа-центр с бассейном, фитнес-зона, научно-исследовательский центр, образовательный центр, лаборатории, номерной фонд на 97 номеров.

Рисунок 4 – Дворец Шено Веггис Health Wellness отель, общий вид, план 1-го этажа

Лансерхоф Тегернзее

Оздоровительный комплекс Лансерхоф Тегернзее, спроектирован бюро Ingenhoven Architects, представляет собой современный медицинский центр, расположенный в живописной местности Баварии. Завершен в 2014 году, комплекс сочетает высокие стандарты медицинского обслуживания с комфортом и экологической устойчивостью. Архитектура здания гармонично вписывается в природный ландшафт благодаря использованию натуральных материалов, таких как дерево и стекло, а также геометрически простым формам и открытым пространствам. Внимание уделено энергоэффективности и устойчивости, что отражается в инновационных фасадах [11]. Общая площадь комплекса: 21000 м².

Перечень основных функциональных зон: ресепшен, ресторан, медицинский центр, спа-центр, фитнес-центр, номерной фонд на 70 номеров.

Рисунок 5 – Оздоровительный комплекс Лансерхоф Тегернзее отель, общий вид, генеральный план

Заключение

Исходя из анализа аналогов можно выявить закономерность проектирования лечебно-оздоровительных комплексов, а также определить перечень необходимых функциональных зон.

Общая площадь комплекса варьируется от количества номеров и от функциональной наполняемости в пределах 10200-21000 м². Количество номеров рассчитывается исходя из предполагаемой заполняемости лечебно-оздоровительного комплекса, а также исходя из сезонности комплекса. Всесезонные комплексы располагают в себе большее количество номеров за счет разнообразия функций и адаптивности комплекса.

Объемно-планировочная структура преимущественно комплексная, с

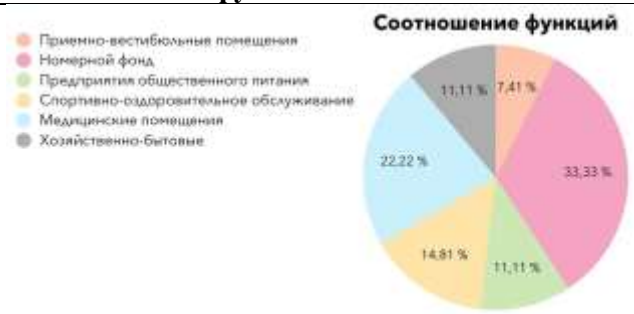
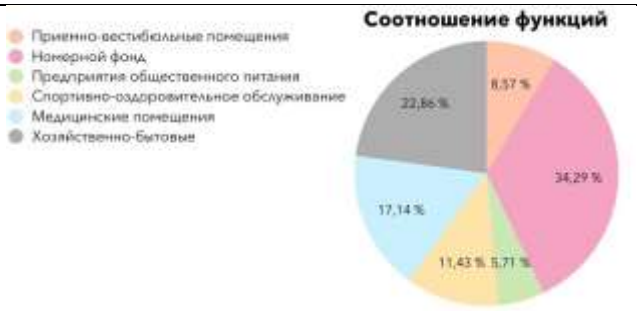
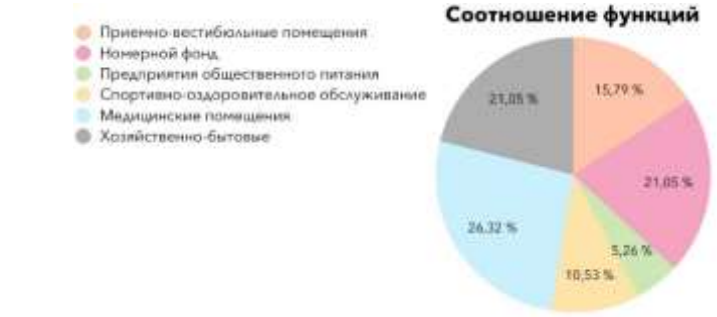
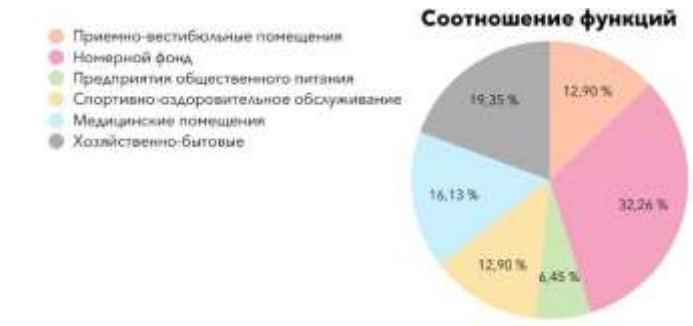
сосредоточением основных функций в едином здании. Изредка возможно расположение определенных функциональных блоков рассредоточено от основного комплекса, например, дома с номерным фондом повышенного уровня, комплекс спа и бассейнов. Оздоровительный и служебный блоки, а также основной номерной фонд преимущественно располагаются в едином здании для удобства оказания оздоровительных услуг. Исходя из анализа можно выявить основные необходимые функциональные блоки лечебно-оздоровительных комплексов:

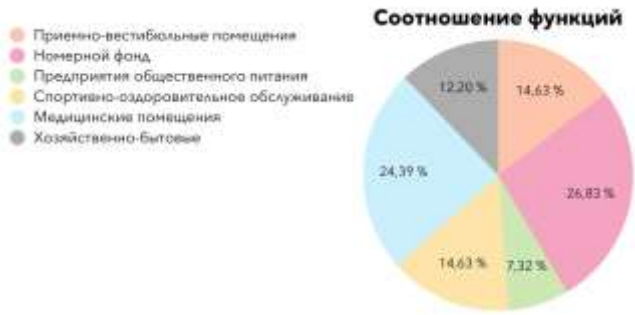
1. приемно-вестибюльные помещения: ресепшен, вестибюль, лаунж-зона;
2. оздоровительная зона: медицинские кабинеты для лечебных процедур, помещения для диагностики;
3. спа-зона: спа-комплексы, массажные кабинеты, процедурные кабинеты, сауны, бани, бассейн;
4. фитнес зона: тренажерные залы, залы групповых занятий;
5. рекреационная зона: пространства для отдыха, рекреации;
6. предприятия общественного питания: ресторан-столовая, кафе;
7. административная зона;
8. хозяйственно-бытовая зона.

Также можно выделить дополнительные функциональные блоки, встречающиеся в современных лечебно-оздоровительных комплексах: конференц-зал, научно-исследовательский центр, научные лаборатории, образовательный центр для врачей.

Анализ современных лечебно-оздоровительных комплексов позволил выявить ключевые принципы их проектирования и определить основные функциональные зоны. Оптимальная объемно-планировочная структура обычно представляет собой комплексное здание с возможностью выделения отдельных специализированных блоков. Важными элементами являются зоны для оздоровительных процедур, спа, фитнеса, отдыха и питания, а также административные и хозяйственные помещения. В современных комплексах также могут быть предусмотрены научные и образовательные зоны.

Таблица 1 – Сводная таблица соотношения функций лечебно-оздоровительных комплексов

Название комплекса	Соотношение функций
Медицинское учреждение Йозефхоф	
Медицинский центр Бад-Шаллербах	
Медицинский Центр Лансерхоф Зюльт	
Дворец Шено Веггис Health Wellness отель	

Название комплекса	Соотношение функций
Лансерхоф Тегернзее	

Список литературы:

1. Мозокина, С. Л. Перспективы развития лечебно-оздоровительного туризма на сельских территориях / С. Л. Мозокина, А. А. Латышева // Туризм на сельских территориях: опыт, проблемы, перспективы: V Международная научно-практическая конференция, Санкт-Петербург, 24 мая 2016 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2016. – С. 85-88. EDN: UAOFIA

2. Мозокина, С. Л. Исторические аспекты развития лечебно-оздоровительного и медицинского туризма / С. Л. Мозокина, А. А. Латышева // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2021. – № 6(132). – С. 79-84. EDN: USGVYW

3. Положихина М. А. Перспективы развития в россии лечебно-оздоровительного туризма // ЭСПР. – 2023. – №4 (56). – С 184-206. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-v-rossii-lechebno-ozdorovitelnogo-turizma (дата обращения: 29.05.2025).

4. Мозокина, С. Л. Тенденции развития лечебно-оздоровительного и медицинского туризма // Известия СПбГЭУ. 2014. – №5 (89). – С. 42-46. EDN: TBHKVL

5. World Health Organization, Regional Office for Europe. Putting health at the heart of tourism development in small countries of the WHO European Region: policy brief / World Health Organization. Regional Office for Europe, 2022. – 32 p. – WHO-EURO-2022-6156-45921-66177. [Электронный ресурс] – URL: https://www.who.int/europe/publications/i/item/WHO-EURO-2022-6156-45921-66177 (дата обращения: 25.01.2026).

6. Федеральный закон от 24.11.1996 № 132-ФЗ «Об основах туристской деятельности в Российской Федерации» : принят Гос. Думой 4 окт. 1996 г. : одобрен Советом Федерации 14 нояб. 1996 г. – Текст: электронный // КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_12462/ (дата обращения: 08.06.2026).

7. Health Care Facility Josefhof // Dietger Wissounig Architekten: официальный сайт. – URL: https://www.archdaily.com/924253/health-care-facility-josefhof-dietger-wissounig-architekten (дата обращения: 20.05.2025).

8. Medical Resort Bad Schallerbach / Architects Collective ZT-GmbH (AC)//ArchDaily. – URL: https://www.archdaily.com/459571/medical-resort-bad-schallerbach-architects-collective-zt-gmbh-ac (дата обращения: 20.05.2025).

9. Lanserhof Sylt Health Resort / Ingenhoven associates // ArchDaily. – URL: https://www.archdaily.com/1004635/lanserhof-sylt-health-resort-ingenhoven-associates (дата обращения: 20.05.2025).

10. Chenot Palace Weggis Health Wellness Hotel / Davide Macullo Architects // ArchDaily. – URL: https://www.archdaily.com/946818/chenot-palace-weggis-health-wellness-hotel-davide-macullo-architects (дата обращения: 20.05.2025).

11. Lanserhof Tegernsee / ingenhoven architects // ArchDaily. – URL: https://www.archdaily.com/540787/lanserhof-tegernsee-ingenhoven-architects (дата обращения: 20.05.2025).

УДК 711.4(477.75)"19"

Вайтенс А. Г., Рыбалко В. С.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

РАЗВИТИЕ ЛЕНИНСКОГО РАЙОНА КЕРЧЕНСКОГО ПОЛУОСТРОВА В XX ВЕКЕ: ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЕ, АГРАРНЫЕ И ИНФРАСТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ

Аннотация: в статье рассматривается развитие Ленинского района Керченского полуострова в XX веке с учётом природно-географических, социально-экономических и градостроительных факторов. Особое внимание уделено роли выгодного транспортно-географического положения района, его аграрно-сырьевой специализации, водохозяйственных ограничений и зависимости от Керчи как крупного промышленного центра Восточного Крыма. Анализируются основные этапы развития территории: дореволюционное хозяйственное освоение, советская коллективизация, последствия Великой Отечественной войны, послевоенное восстановление, модернизация 1950-1980-х годов и кризис конца XX века. Отдельно выделено значение Щёлкино и проекта Крымской АЭС как примера нереализованного индустриально-градостроительного сценария. Сделан вывод о том, что развитие Ленинского района сочетало значительные достижения в сельском хозяйстве, инфраструктуре и социальной сфере с сохранявшимися структурными ограничениями, связанными с периферийностью, дефицитом пресной воды и слабой стратегией распределения ресурсов экономики.

Ключевые слова: Ленинский район, Керченский полуостров, Крым, советская модернизация, сельское хозяйство, водоснабжение, Щёлкино, Крымская АЭС.

Ленинский район занимает особое место в системе расселения и хозяйственного освоения Восточного Крыма. Он охватывает значительную часть Керченского полуострова, 2920 кв. км, что составляет 11,2% территорий Крыма: это крупнейший по площади район Республики. Связан сразу с несколькими пространственными факторами: Район омывается Азовским морем на севере и Чёрным морем на юге, а протяжённость пляжной линии составляет около 193 км на Азовском побережье и 90 км на Черноморском побережье, соседством с Керчью, наличием степных сельскохозяйственных угодий, рыбных ресурсов, строительных материалов, соляных и грязевых озёр. Такое сочетание позволяло рассматривать район не только как аграрную периферию, но и как потенциальную транспортную, промышленную и рекреационную зону.

История района в XX веке выявляет противоречие между объективными предпосылками роста и фактической траекторией освоения. Он получил устойчивый вектор развития в сельском хозяйстве, рыболовстве и

обслуживании локальных связей, однако не превратился в самостоятельный промышленно-транспортный центр Восточного Крыма.

При рассмотрении темы необходимо учитывать административную особенность: в начале XX века Ленинский район в современном виде ещё не существовал. В разные периоды территория входила в различные административные образования, а её границы и статус менялись в ходе советских реформ 1920-1930-х годов. 22 июня 1921 года Петровский район Керченского уезда был переименован в Ленинский район с центром в селе Ленинск. Поэтому далее речь идёт о территории современного Ленинского района, рассматриваемой в ретроспективе с учётом изменений административной сетки.

Источниковую основу исследования составляют советские и современные обобщающие труды по истории Крыма, краеведческие издания, статистические сборники, работы по геологии Керченского полуострова, публикации о Великой Отечественной войне, депортациях и послевоенной демографии. Для локальной характеристики особенно важны материалы «Истории городов и сёл Украинской ССР. Крымская область», где район представлен через населённые пункты, хозяйства и социальную инфраструктуру [1]. Современный контекст задают работы по истории Крыма XX века и региональному развитию [2; 3].

Природно-географические предпосылки. Условия Керченского полуострова во многом определили хозяйственную специализацию района. Степной ландшафт создавал возможности для зернового хозяйства и животноводства, однако одновременно ставил жёсткие ограничения из-за засушливости и недостатка постоянных источников пресной воды. В отличие от южнобережных и предгорных районов Крыма, восточная часть полуострова была более уязвима к засухам, ветровой эрозии и колебаниям урожайности.

Важным преимуществом являлось морское положение. Азовское побережье и близость Чёрного моря создавали предпосылки для рыболовства, малых портовых пунктов, перевозок и сезонной рекреации. Однако в течение большей части XX века эти возможности реализовывались ограниченно. Рыболовецкая база укреплялась, но не стала основанием для крупного морехозяйственного комплекса. Использование побережья зависело от состояния дорог, уровня инвестиций и доминирующей роли Керчи как промышленно-портового центра Восточного Крыма. Керченский торговый порт был открыт в 1821 году, а в 1874–1877 годах был сооружён Керчь-Еникальский канал, улучшивший судоходные условия пролива. Для торгового порта указываются открытые складские площадки около 140 тыс. м² и крытые склады около **1**2 тыс. м². Камыш-Бурун специализировался на промышленных грузах: ферросплавах, угле, марганцевом концентрате, коксовой мелочи,

генеральных грузах. Порт был построен в 1951 году как подразделение Камыш-Бурунского железорудного комбината.

Сырьевой потенциал также связывал район с более широкой экономикой Керченского полуострова. Керченский полуостров в начале XX века рассматривался прежде всего как железорудная база. В справочной и энциклопедической литературе того времени керченские руды характеризовались как оолитовые бурые железняки; при этом подчёркивалось, что они имели сравнительно невысокое содержание железа, но значительные запасы. В краеведческих материалах по Керчи указывается оценка запасов железных руд Керченского полуострова около 1,7 млрд тонн, при содержании железа примерно 38–39 %. [4-6; 16]. Промышленная эксплуатация ресурсов была в большей степени сосредоточена вокруг Керчи и отдельных производственных площадок, тогда как сельская территория района выполняла вспомогательные, сырьевые и аграрные функции.

Хозяйство XX века. В позднеимперский период территория будущего Ленинского района развивалась как пространство сельского хозяйства, рыболовства, соледобычи и небольших прибрежных поселений. В 1956 году Ленинское стало центральной усадьбой совхоза «Ленинский»; за хозяйством было закреплено 16 489 га земли, из них около 9 000 га пашни. Население было рассредоточено, инфраструктура оставалась слабой, а хозяйственные связи тяготели к Керчи. Для района были характерны низкая плотность населения, зависимость от природных условий и ограниченность перерабатывающих производств. По переписи 1926 года в селе Ленинское было 191 двор и 790 жителей; среди них учитывались русские, украинцы, греки, татары и другие группы. Это определило стартовые условия советской модернизации.

После революции и Гражданской войны хозяйственное развитие оказалось включено в советскую модель планового освоения. Национализация, коллективизация, создание колхозов, совхозов и рыболовецких артелей изменили организацию производства. Земля, техника, трудовые ресурсы и распределение продукции всё в большей степени подчинялись государственным планам. Для территории района это означало переход от разрозненных форм хозяйствования к административно организованной аграрной системе.

Коллективизация 1930-х годов имела двойственный результат. С одной стороны, она позволила создать крупные хозяйственные единицы (Совхоз «Ленинский» – 16 500 га земли, Ленинская МТС, Совхоз «Семисотка» - 11 720 га сельскохозяйственных угодий, Колхоз «Первое мая» - 5100 га сельхозугодий, из них 2770 га пахотных земель, Рыболовецкие колхозы - 15 колхозов, из них 4 рыболовецких, а также 8 совхозов; за ними закреплялось 189 тыс. га сельскохозяйственных угодий, в том числе 109 тыс. га пашни.), централизовать снабжение, расширить механизацию и включить район в

общекрымскую систему производства. С другой стороны, новые формы хозяйствования не устраняли природных ограничений: нехватки воды, слабости дорог, удалённости отдельных поселений и зависимости от внешнего снабжения. Поэтому раннесоветский этап следует рассматривать как период институционального оформления района, но не как время полного раскрытия его экономического потенциала.

Таблица 1. Основные этапы развития территории современного Ленинского района в XX веке.

Период	Ключевые процессы	Основной результат
1900-е - 1930-е гг.	Аграрное хозяйство, рыболовство, советская административная перестройка, коллективизация.	Формирование районной хозяйственной системы и переход к плановой модели.
1941-1950-е гг.	Военные действия на Керченском полуострове, разрушения, депортации, восстановление.	Демографический и хозяйственный перелом, восстановление колхозов и инфраструктуры.
1950-1970-е гг.	Механизация, электрификация, развитие сельского хозяйства, дорог, социальной сферы и водных проектов.	Наиболее устойчивый рост хозяйственной и социальной инфраструктуры.
1970-1980-е гг.	Строительство Щёлкино и Крымской АЭС, попытка индустриального рывка.	Возникновение нового городского центра, но незавершённость индустриального сценария.
1990-е гг.	Распад СССР, кризис совхозно-колхозной системы, приватизация, безработица, отток населения.	Снижение производства и переход к постсоветской модели выживания территории.

Война и послевоенное восстановление. Великая Отечественная война стала одним из самых разрушительных событий в истории Керченского полуострова. Бои за Керчь 16 ноября 1941 г., десантные операции 26 декабря 1941 - 2 января 1942 г., первое освобождение 30 декабря 1941 г., повторная оккупация Керчи 19 мая 1942 г., Крымская наступательная операция 8 апреля - 12 мая 1944 г. Разрушение дорог, хозяйственных построек и объектов связи нанесли тяжёлый ущерб району. С точки зрения военной истории Восточный Крым имел ключевое значение как пространство, через которое проходили связи между Крымом, Кавказом и акваторией Чёрного моря. [10; 11]. Для

Ленинского района это означало не только физическое разрушение инфраструктуры, но и длительный демографический надлом.

Ключевым последствием военного периода стали изменения состава населения. Депортации народов Крыма, послевоенное переселение и восстановление хозяйств существенно изменили этническую и социальную структуру региона. Данные переписи население за 1959 г.: Керченский горсовет, г. Керчь: Всего населения - 98 769, из них Мужчин - 43 698 чел., Женщин – 55 071 чел. Ленинский район, сельское население: Всего населения - 56 336, из них Мужчин - 26 889 чел., Женщин – 29 467 чел.

Исследования Н. Ф. Бугая, В. Н. Земскова и В. М. Кабузана позволяют рассматривать эти процессы не как локальный эпизод, а как часть широкой политики принудительных миграций и послевоенного переустройства крымского пространства [12-14]. В результате многие сёла получили новое население, новые названия и новую хозяйственную организацию.

Послевоенное восстановление 1940-1950-х годов было направлено прежде всего на возвращение сельскохозяйственного производства, ремонт дорог, восстановление жилищного фонда, школ, клубов, медицинских пунктов и рыболовецкой инфраструктуры. Однако восстановление не означало простого возвращения к довоенному состоянию. Район вступал в новый этап уже с иной демографией, иной административной логикой и более жёсткой зависимостью от государственных программ развития.

Советская модернизация 1950-1970-х годов. Наиболее интенсивные изменения в Ленинском районе пришлись на послевоенные десятилетия. Именно тогда укреплялись колхозы и совхозы, расширялась механизация, развивались животноводство, зерновое производство, виноградарство, овощеводство, дорожная сеть и социальная сфера. Статистические сборники Крымской области показывают общий рост сельскохозяйственного производства, электрификации, строительства и бытового обслуживания, хотя район по-прежнему уступал крупным городским центрам по уровню промышленной концентрации [8; 9].

Особое значение имела социальная модернизация. В сёлах появились новые школы, дома культуры, библиотеки, фельдшерско-акушерские пункты, магазины, автобусные маршруты. Эти изменения были не менее важны, чем рост валовой продукции, поскольку формировали советский тип сельского быта. Ленинский район постепенно превращался из разреженного степного пространства в более связанную сеть населённых пунктов, включённых в районное управление, образовательную и медицинскую системы.

С градостроительной точки зрения модернизация проявилась не только в появлении отдельных объектов, но и в изменении пространственной организации района. Советская сеть сёл стала более иерархичной: Ленино закреплялось как административный центр, опорные населённые пункты

связывались дорогами и автобусными маршрутами, а производственные зоны формировались при колхозах, совхозах, рыбных базах и карьерах. На этом фоне Щёлкино представляло иной тип планировочного решения - новый город при крупной КАЭС, с многоэтажной застройкой, общественными учреждениями и расчётом на постоянный приток специалистов. Сопоставление сельской сети, районного центра и незавершённого города-спутника показывает, что градостроительное развитие Ленинского района в XX веке оставалось неоднородным и зависело от крупных государственных проектов.

В то же время модернизация имела пределы. Район оставался зависимым от природных условий и от централизованного распределения ресурсов. Нехватка пресной воды была главным фактором, ограничивавшим сельское хозяйство. Развитие орошения и Северо-Крымского канала стало попыткой изменить саму природную основу хозяйства степного Крыма. Северо-Крымский канал был построен в 1961–1971 годах, доходил до Керчи и снабжал Крым водой из Днепра; восток Крыма от Судака до Керчи почти не имел собственных поверхностных источников воды. Вода рассматривалась как условие интенсификации земледелия, расширения кормовой базы и повышения устойчивости сельского хозяйства [7].

Нереализованная индустриализация: Щёлкино и Крымская АЭС. Особое место в истории района занимает позднесоветский проект строительства города Щёлкино и Крымской атомной электростанции [15]. В 1970-1980-е годы существовал вариант перехода от аграрно-сырьевой специализации к индустриально-энергетической модели. Новый город должен был стать центром притяжения специалистов, строителей и обслуживающих предприятий, а АЭС - крупным объектом энергетической инфраструктуры Крыма.

Решение о строительстве Крымской АЭС было принято в августе 1969 года, первые работы будущего города начались в 1976 году, а первый жилой дом был заложен в 1978 году и построен в 1979 году. Для территории, где ранее доминировали сельское хозяйство и небольшие посёлки, это был качественно новый тип развития. В случае завершения проекта район мог получить устойчивую индустриальную основу, новые рабочие места и более высокий уровень транспортно-социальной инфраструктуры. В ноябре 1980 года стройка была объявлена республиканской ударной комсомольской, а 26 января 1984 года — всесоюзной ударной; в 1980-е строились детские сады, школы, торговый центр, амбулатория, дом быта.

Авария на Чернобыльской АЭС, рост экологических опасений, экономические трудности позднего СССР и последующий распад страны привели к остановке проекта. В результате Щёлкино стало символом нереализованной модернизации: город появился, но базовый промышленный

объект, ради которого он создавался, не был введён в эксплуатацию. Этот пример особенно важен для понимания противоречий развития Ленинского района: территория получила элементы городской инфраструктуры, но не получила полноценной индустриальной функции.

Кризис конца XX века. Перестройка и 1990-е годы стали переломом для всей советской системы хозяйствования. Для Ленинского района это означало распад прежних производственных связей, ослабление колхозов и совхозов, сокращение государственного финансирования, рост безработицы и отток населения. Особенно болезненным стало то, что район зависел от крупных централизованных решений: воды, топлива, техники, закупок, распределения продукции и социальных расходов.

Переход к рыночной экономике сопровождался приватизацией, дроблением хозяйств и снижением устойчивости сельского производства. Часть населения была вынуждена перейти к личным подсобным хозяйствам, сезонной занятости, мелкой торговле и обслуживанию локального туризма. Население города составляло 14 659 человек в 1989 году и 11 699 человек в 2001 году. Это снижение примерно на 2960 человек, или около 20,2 %. Азовское побережье, Казантип, Щёлкино и отдельные природные объекты постепенно стали восприниматься как рекреационный ресурс, однако в 1990-е годы этот потенциал развивался фрагментарно и не компенсировал общий хозяйственный спад.

Выводы: Главными достижениями XX века стали административное оформление района, укрепление сети населённых пунктов, создание крупных сельскохозяйственных хозяйств, расширение дорог, электрификация, социальное строительство и частичное решение водной проблемы. Советская модернизация изменила повседневную жизнь населения и включила район в общекрымскую хозяйственную систему.

Одновременно проявились ограничения. Во-первых, экономика района оставалась слабо распределенной среди различных направлений. Во-вторых, развитие сильно зависело от Керчи и централизованных решений. В-третьих, водный дефицит и экологическая уязвимость степной зоны сохранялись даже после крупных инфраструктурных проектов. В-четвёртых, промышленный сценарий развития, связанный с Крымской АЭС, оказался незавершённым.

Возможный альтернативный путь развития мог включать более раннее усиление портово-паромных функций, переработку рыбы и сельскохозяйственной продукции, развитие рекреации Азовского побережья, археологического и природного туризма, а также перепрофилирование инфраструктуры Щёлкино после остановки АЭС. Однако в условиях советской централизованной экономики и кризиса 1990-х годов эти направления не получили системной реализации.

Исторический опыт Ленинского района показывает, что периферийные территории не могут опираться только на ресурсы и выгодное положение. Им необходимы устойчивые транспортные связи, переработка местной продукции, экологически продуманное водопользование, поддержка малых городов и разнообразная экономическая база.

Список литературы:

1. История городов и сёл Украинской ССР: Крымская область. - Киев: Главная редакция Украинской советской энциклопедии, 1974.

2. История Крыма [Текст] : [Крым в истории, культуре и экономике России] : в двух томах / Российское историческое общество [и др.] ; ответственный редактор А. В. Юрасов. - Москва : Кучково поле, 2017. Т. 2. - 2017. - 789 с., [8] л. цв. ил.; ISBN 978-5-9950-0872-9

3. Дюличев В.П. Крым. История в очерках. XX век. - Симферополь, 2005. ISBN 966-96158-3-6

4. Науменко П.И., Шнюков Е.Ф. Полуостров сокровищ. - Симферополь: Таврия, 1973.

5. Керченский железорудный бассейн. - М.: Недра, 1966.

6. Аленкин В. М., Иноземцев Ю. И. и др. Геология шельфа УССР. Керченский пролив. - Киев: Наукова думка, 1981.

7. Бабенков Н. А. Орошаемое земледелие Крыма. - Симферополь, 1984.

8. Крымская область в цифрах: статистический сборник. - Симферополь, разные годы.

9. Народное хозяйство Крымской области: статистический сборник. - Симферополь, 1960-1980-е гг.

10. Акулов М. Р. Керчь - город-герой. - М.: Воениздат, 1980.

11. Абрамович С.Н., Щербак С. М. Огненная земля. - Симферополь: Таврия, 1972.

12. Депортация народов Крыма Документы, факты, коммент. / Предисл., сост., заключение и коммент. Н. Ф. Бугая. — М. : ИНСАН, 2002. — 238 с.; 21. — ISBN 5-85840-304-2.

13. Земсков В.Н. Спецпоселенцы в СССР, 1930-1960 / В. Н. Земсков; Рос. акад. наук. Ин-т рос. истории. - Москва : Наука, 2003. - 304, [2] с.; 22 см.; ISBN 5-02-008855-2

14. Кабузан В. М. Население Крыма в XVIII-XX вв. - М., 1976.

15. Щёлкино // Крымоведческий портал «Таврида»: справочные материалы по истории населённых пунктов Крыма. URL: https://tavrida.crimealib.ru/

16. Керчь индустриальная: экономический справочник по г. Керчи и району / под ред. Н.В. Цапкина и М. Эрлиха. Керчь: Крымское государственное издательство, 1932. 239 с.

УДК 725.5

Стрелкова Е. Д.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

АНАЛИЗ АРХИТЕКТУРНЫХ ПОДХОДОВ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ САНАТОРНЫХ И БАЛЬНЕОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация. В настоящей статье рассматриваются эволюция и современное состояние архитектурных подходов к проектированию санаторных и бальнеологических комплексов. Автором проводится системный анализ функциональных, планировочных и ландшафтно-средовых решений, характерных для медицинских учреждений восстановительного профиля. Особое внимание уделяется принципам интеграции лечебных корпусов с природным окружением, требованиям к организации бальнеологических отделений, а также вопросам трансформации внутреннего пространства под влиянием новых методик реабилитации. В работе выявляются основные стилистические и типологические модели, включая центричную, павильонную и блочно-модульную структуры. На основе ретроспективного анализа формулируются актуальные тенденции в области архитектуры санаторных зданий, ориентированные на персонализацию среды, энергоэффективность и психоэмоциональный комфорт пациента.

Ключевые слова: санаторный комплекс, бальнеологический комплекс, архитектура медицинских учреждений, лечебно-оздоровительная среда, планировочная структура, реабилитационное пространство, бальнеотехническая инфраструктура.

Проектирование санаторных и бальнеологических комплексов представляет собой одну из наиболее сложных междисциплинарных задач в современной архитектуре. В отличие от учреждений острого стационара, где доминирует принцип строгой функциональной эффективности, санаторная архитектура обязана сочетать лечебный процесс с длительным пребыванием человека, условиями бытового комфорта, а также с возможностью психоэмоциональной разгрузки. Бальнеологическая составляющая вносит дополнительные технологические ограничения, связанные с подачей минеральных вод, паро- и грязелечением, что требует специальных инженерных решений и планировочных зон с повышенной коррозионной стойкостью. В последние десятилетия наблюдается смена парадигмы: от «лечения болезни» к «восстановлению ресурсов человека». Это повлекло за собой пересмотр архитектурных подходов, где ранее главенствовала медико-техническая целесообразность, сегодня на передний план выходят принципы средового подхода, биопозитивной архитектуры и индивидуализированного пространства [1].

Зарождение специализированной архитектуры бальнеологических учреждений восходит к периоду расцвета курортного дела в Европе XVIII–XIX веков. На первых этапах господствовала павильонная система, когда источники минеральной воды обустраивались отдельными малыми постройками –купальнями, питьевыми галереями, а размещение пациентов происходило в окружающих пансионатах или частных гостевых домах. Павильонный подход обеспечивал максимальную изоляцию лечебных процедур от жилой среды и позволял гибко наращивать функции, однако создавал проблему коммуникационных связей, особенно в неблагоприятный сезон.

Российская школа проектирования санаториев, активное развитие которой пришлось на 1920–1930-е годы, а затем на послевоенный период, предложила альтернативу в виде моноблочной композиции. Крупногабаритные корпуса, объединяющие спальные секции, столовые, диагностические и бальнеологические отделения, решали задачу компактности и всепогодной доступности. Классическими примерами служат санатории Южного берега Крыма и Кавказских Минеральных Вод, где значительная высота зданий позволяла использовать рельеф и открывать видовые панорамы. Однако моноблочный подход нередко вел к чрезмерной централизации, возникновению длинных коридоров без естественного освещения и снижению ощущения связи с природой.

Как верно отмечают Маркина К.Г., Моргун Н.А., середина XX века ознаменовалась возвращением к идее рассредоточенной композиции, но на новом технологическом уровне. Появился блочно-модульный подход, при котором отдельные функциональные блоки соединяются остекленными переходами или подземными галереями. Такое решение позволяет выполнять поэтапную реконструкцию, обеспечивает проветривание и зонирование потоков: раздельное движение отдыхающих, персонала и транспорта бальнеотехнического обслуживания. Примером могут служить финские и шведские реабилитационные центры, где модули лечебных ванн вынесены в отдельные малоэтажные объемы, а спальные корпуса расположены на некотором удалении в лесной зоне [2].

Современная классификация архитектурных подходов к проектированию санаторных и бальнеологических комплексов включает несколько базовых моделей. Первая – центричная или зальная модель, применяемая в случаях, когда вокруг главного атриума или лечебно-диагностического ядра группируются все остальные помещения. Такое решение характерно для небольших бальнеологических центров в границах города или реконструируемых исторических зданий. Преимуществом становится наглядная ориентация и сокращение путей движения посетителей, недостатком –ограниченная емкость и возможное взаимное акустическое

влияние различных зон. Вторая модель – линейно-осевая, где вдоль главной пешеходной оси или крытой галереи последовательно располагаются функциональные сегменты: входная группа с вестибюлем, диагностическое отделение, бальнеологический блок с ванными и душевыми, затем блок процедурной гимнастики и выход в спальный корпус. Линейная схема упорядочивает лечебный маршрут пациента и естественно вписывается в вытянутый рельеф прибрежных или горных территорий. Однако она требует строгого соблюдения поточности и может создавать избыточные перемещения для пациентов с ограниченной подвижностью.

Третья модель – рассеянно-павильонная, признанная в настоящее время наиболее адекватной для санаториев высокого комфорта и специализированных бальнеологических клиник. В этом подходе спальные, лечебные, ресторанные и административные корпуса представляют собой самостоятельные архитектурные объекты, интегрированные в ландшафтный парк. Связь между ними осуществляется через крытые или открытые аллеи, а в холодное время года –через теплые переходы с зенитным освещением. Рассеянно-павильонная модель максимально сохраняет природное окружение, позволяет варьировать этажность и материал стен под конкретные функциональные требования (например, повышенная влажность в бассейне, особая звукоизоляция в спальных блоках) [3].

Бальнеологическая функция накладывает наиболее жесткие технологические ограничения на архитектуру. Отделение водолечения должно размещаться, как правило, на первом или цокольном этаже, с возможностью беспрепятственного подвода труб минеральной воды, которая часто обладает повышенной температурой, минерализацией и газовыделением. Архитектору необходимо предусмотреть эффективную приточно-вытяжную вентиляцию с кратностью воздухообмена не менее шести-восьми, а также покрытия стен, полов и потолков, устойчивые к воздействию сероводородных, углекислых и радоновых сред.

Особое значение приобретает зонирование влажных и сухих процессов. В непосредственной близости от ванного зала размещают раздевальные с индивидуальными шкафами, комнаты отдыха после процедур и кабинеты медицинского персонала. Классическая ошибка прошлых десятилетий – совмещение бальнеологических процедурных с транзитными коридорами, ведущими в спальные корпуса. Современный подход требует организации так называемого «чистого» и «грязного» потока, где использованные простыни, оборудование и отработанная вода удаляются отдельным маршрутом, не пересекающимся с движением пациентов в халатах и домашней обуви. Пространственная пластика бальнеологического блока все чаще решается с использованием криволинейных форм, скругленных углов и ниш для сидения, что связано не только с безопасностью (снижение травматизма на влажных

полах), но и с психотерапевтическим эффектом «текучих», пластичных объемов, ассоциирующихся с водой.

Архитектура санаторных комплексов базируется на глубокой связи с природной средой как лечебном факторе (ландшафтотерапия). Проектные подходы различаются степенью проникновения природы в постройку. Закрытый тип, преобладающий в северных и высокогорных центрах, предполагает отделение здания термальным контуром при сохранении визуального контакта через панорамные окна, зимние сады и атриумы. Открытый тип, характерный для южных курортов, использует максимальную разомкнутость: террасы, галереи, перголы и выходы ванных комнат на индивидуальные патио-садики, что сочетает водные процедуры с аэротерапией. Промежуточный вариант представлен трансформируемыми фасадами с раздвижными остекленными панелями. Подход «зеленой кровли» в условиях плотной застройки или крутых склонов превращает эксплуатируемую кровлю бальнеологического отделения в прогулочную террасу с дополнительной тепло- и звукоизоляцией [4].

Проектирование санаторных зданий опирается на принципы универсального дизайна и эргономики, учитывающие сниженную мобильность пациентов. Обязательными атрибутами выступают ширина коридоров, поручни и тактильная разметка. Глубинная адаптивность обеспечивается возможностью перепланировки без капитальных вмешательств посредством сборно-разборных перегородок, прокладки сетей в технических этажах и унифицированной сетки колонн. В области бальнеологических кабин произошел переход от стационарных ванн к мобильным установкам и одноместным боксам, что изменило архитектурный модуль: вместо залов 60–100 м² с жестко закрепленными ваннами сегодня преобладают ячейки на одну-две персоны с индивидуальной регулировкой параметров среды.

Параметры светоцветовой и акустической среды имеют доказанное реабилитационное действие. Северные и западные ориентации отводятся для процедурных с рассеянным светом, южные и восточные –для комнат дневного пребывания и холлов, где инсоляция поддерживает циркадные ритмы. От монохромной бело-голубой гаммы, усиливающей тревожность, архитекторы переходят к акцентным природным оттенкам (терракота, оливковый, песчаный) в зонах ожидания. Акустический комфорт достигается расчленением объемов, звукопоглощающими потолочными плитами и исключением больших гладких поверхностей, а также тщательной шумоизоляцией насосных станций от залов отдыха [5].

Проведенный анализ архитектурных подходов к проектированию санаторных и бальнеологических комплексов позволяет утверждать, что современная типология этих объектов эволюционирует от жестко

централизованных лечебных учреждений к адаптивным, ландшафтно-интегрированным системам, где природная среда, эргономика и психоэмоциональные параметры пространства приобретают статус равнозначных терапевтических факторов. Установлено, что наиболее перспективными являются рассеянно-павильонная и блочно-модульная планировочные модели, обеспечивающие гибкость функционирования, зонирование лечебно-реабилитационных потоков и высокий уровень комфорта пациента. Вместе с тем выявлена недостаточная актуализация существующих нормативных требований, что требует дальнейшей разработки специализированных критериев оценки архитектурного качества санаторно-бальнеологических объектов с учетом региональных климатических особенностей и профиля медицинской реабилитации.

Список литературы:

1. Ирхина К. С., Моргун Н. А. Формирование санаторно-курортного комплекса на черноморском побережье Республики Крым, города Саки // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2019. – № 1 (27). – С. 83-90. EDN: TKNWVR
2. Маркина К. Г., Моргун Н. А. Особенности территориально-функционального формирования приморских санаторно-курортных учреждений юга России // МНИЖ. – 2021. – №8-1 (110). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-territorialno-funktsionalnogo-formirovaniya-primorskih-sanatorno-kurortnyh-uchrezhdeniy-yuga-rossii (дата обращения: 18.05.2026).
3. Markina K.G. The historical context of the formation patterns of recreational and medical facilities / K.G. Markina, N.A. Morgun // International Research Journal. – 2021. – №2 (104). – С. 80-98. DOI: 10.23670/IRJ.2021.103.2.014 EDN: YCWYVW
4. Оборин М.С. Стратегическое позиционирование бальнеологического потенциала курортных территорий Пермского края и Республики Башкортостан на основе анализа конкурентной среды // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2022. – № 6-1. – С. 129-138. DOI: 10.17513/vaael.2256 EDN: XBGSJZ
5. Моргачев А. В., Матвеева Ю. В. Особенности проектирования оздоровительных комплексов // Актуальные исследования. – 2022. – №29 (108). – С. 27-28. EDN: KVXFCO

УДК 725

Цыбульникова Мария, Вешняков А. В.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

МЕТОДЫ И ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ ГОСТИНИЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА РЕЛЬЕФЕ (НА ПРИМЕРЕ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА)

Аннотация. В статье рассматриваются методы и принципы архитектурного проектирования многоуровневых гостиничных комплексов в условиях сложного рельефа на примере Южного берега Крыма. Целью исследования является систематизация подходов к интеграции крупных туристических объектов в природный ландшафт при сохранении его уникальных характеристик и обеспечении высокого уровня комфорта. На основе анализа проектных материалов и существующей практики выявлены ключевые градостроительные, объемно-планировочные и инженерные приемы, определяющие устойчивое развитие гостиничной архитектуры в горных прибрежных зонах.

Ключевые слова: гостиничный комплекс, сложный рельеф, террасирование, архитектурная интеграция, Южный берег Крыма, многоуровневое проектирование, ветроэнергетика, устойчивая архитектура.

Введение

Современные гостиничные комплексы в курортных зонах рассматриваются не только как объекты временного проживания, но и как сложные пространственные системы, формирующие среду для отдыха, оздоровления, коммуникации и социальной активности. В условиях Южного берега Крыма, в частности в регионе Алушты, гостиничный комплекс приобретает дополнительное значение как фактор круглогодичного туристического развития, притяжения отдыхающих и интеграции рекреационной инфраструктуры в природный ландшафт.

Особую актуальность приобретает задача проектирования многоуровневых гостиничных комплексов на сложном рельефе, поскольку именно эти территории обладают наибольшей живописностью и туристической привлекательностью. Проектируемый многофункциональный гостиничный комплекс в Алуште ориентирован на создание открытой, гибкой и многоуровневой архитектурной среды, отвечающей актуальным требованиям туристической отрасли и учитывающей сложные природно-климатические условия региона [2].

Методы проектирования и исследования

Исследование архитектурно-планировочных решений многоуровневых гостиничных комплексов на рельефе основано на комплексном методологическом подходе, сочетающем теоретический анализ, проектное

моделирование и сравнительное исследование существующих объектов. В качестве основного метода использован архитектурно-проектный анализ, включающий изучение пространственной структуры комплекса, объемно-планировочных решений и функционального зонирования с учетом перепадов высот.

Дополнительно применялись методы натурного обследования существующих гостиничных комплексов Крыма, анализ литературных источников и нормативной документации, а также методы компьютерного моделирования аэродинамических процессов для оптимизации формы здания с учетом ветрового режима территории.

Научная новизна исследования заключается в комплексном анализе методов проектирования гостиничных комплексов в условиях сложного рельефа применительно к специфике Южного берега Крыма. В работе систематизированы архитектурные и планировочные решения, позволяющие эффективно использовать перепады высот для создания выразительной объемно-пространственной композиции. Новизна исследования также состоит в выявлении принципа «горизонтальной интеграции», при котором гостиничный комплекс рассматривается как система террас и уровней, продолжающих естественную структуру ландшафта, а также в разработке методов использования ветрового потенциала территории для энергоснабжения комплекса [4].

Принципы проектирования гостиничных комплексов на рельефе

Анализ проектных решений позволяет выявить систему принципов, определяющих организацию многоуровневых гостиничных комплексов и их функциональное взаимодействие с природной средой.

1. Принцип террасирования и ступенчатой организации объемов

В условиях перепада высот от 18 метров и более целесообразно применение террасной схемы застройки, при которой здание как бы «врезается» в склон, повторяя его очертания [1]. Террасирование обеспечивает высокую плотность застройки, уменьшает объем земляных работ, дает возможность эксплуатации кровель нижележащих этажей. Это позволяет создать открытые пространства общего пользования и приватные террасы при номерах, ориентированные на море.

Как показывает практика проектирования, террасная гостиница гармонично сочетается с рельефом, а перепад высот в 18-20 метров позволяет организовать 5-7 уровней с минимальным вмешательством в природную среду. При этом каждый последующий уровень смещен относительно предыдущего, что обеспечивает инсоляцию и видовые характеристики всех номеров. Важно отметить, что террасирование позволяет также решить проблему организации пешеходных связей: вертикальные коммуникации

(лифты, лестницы) дополняются системой пандусов и террасных переходов, связывающих разные уровни комплекса в единую пешеходную сеть.

2. Принцип учета ветрового режима и горно-долинных циркуляций

Характерной особенностью, формирующей микроклимат Южного берега Крыма, являются прохладные ночные потоки воздуха с гор – катабатические ветры, в частности «бора́» со скоростью до 40 м/с [2]. При проектировании необходимо учитывать направление господствующих ветров и использовать аэродинамические свойства архитектурной формы.

Анализ показывает, что оптимальным является расположение гостиницы в местах понижения рельефа, что позволяет охлаждаться прохладными потоками воздуха в ночное время. При наличии господствующего ветра целесообразно проектировать скатные кровли с ориентацией, обеспечивающей сдувание снега и защиту от ветровых нагрузок. Однако современные подходы предполагают не просто защиту от ветра, а использование ветрового потенциала для энергоснабжения комплекса. Размещение ветроэнергетических установок в зонах ускоренного потока, формируемого архитектурной формой, позволяет достичь скорости генерации 4.5-5 м/с при фоновых показателях 2.8 м/с. Это повышает эффективность ветрогенерации на 25-30% по сравнению с базовым сценарием.

Особого внимания заслуживает аэродинамическое моделирование формы здания. Как показывают исследования, криволинейные поверхности, волнообразные профили кровель и парусоподобные формы способствуют сжатию и ускорению воздушного потока в заданных зонах. Например, форма вздернутого паруса с углом подъема 25-30° создает зону повышенного давления и направленного ускоренного потока в области гребня, что позволяет эффективно размещать ветрогенераторы именно в этих точках.

3. Принцип видовой ориентации и раскрытия панорам

При проектировании жилых этажей гостиниц необходимо учитывать возможность обзора из номеров интересных видов [2]. На Южном берегу Крыма, где основным ресурсом является морская панорама, здания ориентируются вдоль склона с максимальным раскрытием фасадов в сторону акватории.

Угол наклона кровель и террас (оптимально 25-30°) позволяет обеспечить визуальную связь каждого номера с морем даже при плотной застройке. Практика показывает, что многоэтажные корпуса с двух-трехуровневыми сблокированными ячейками наиболее экономичны и отвечают высокому уровню комфорта. При этом важно обеспечить не только видовые характеристики, но и защиту от избыточной инсоляции, что достигается применением солнцезащитных элементов, интегрированных в архитектурную форму.

Важным аспектом является также организация общественных пространств с максимальным видовым раскрытием. Рестораны, спа-зоны, бассейны и террасы общего пользования располагаются таким образом, чтобы обеспечить панорамный обзор моря и горного ландшафта. Это повышает привлекательность комплекса и его конкурентоспособность на туристическом рынке.

4. Принцип интеграции архитектуры в ландшафт

Для гостиниц, расположенных в горных районах, характерны два основных подхода к их архитектурно-художественным решениям: противопоставление ландшафту или гармоническое слияние с ним [4]. В условиях уникальных природных комплексов Крыма предпочтительным является второй подход – архитектура должна подчиняться горному силуэту.

Это достигается применением местных строительных материалов (камень, дерево), террасированием, скатными кровлями с их последующим озеленением. Визуальное слияние проектируемой гостиницы с ландшафтом обеспечивают повторением его особенностей: цвета, членений, формы рельефа, а также за счет включения элементов рельефа в интерьер.

Особую роль играет озеленение эксплуатируемых кровель и террас. Оно не только улучшает микроклимат и эстетические характеристики комплекса, но и способствует его визуальной интеграции в природную среду. При взгляде со стороны гор или моря озелененные террасы воспринимаются как продолжение естественного ландшафта, что снижает визуальное воздействие застройки.

5. Принцип функциональной иерархии и зонирования территории

Многоуровневый гостиничный комплекс на рельефе требует четкой функциональной организации территории. Как правило, выделяются следующие зоны: входная (вестибюльная) группа с главным подъездом и парковкой, общественная зона с ресторанами, спа и развлекательными помещениями, зона проживания (номерной фонд), спортивно-оздоровительная зона с бассейнами и спортплощадками, хозяйственная зона [3].

В условиях перепада высот функциональное зонирование осуществляется по вертикали. На верхних отметках, прилегающих к дороге, располагаются входная группа и парковка. Далее по склону вниз последовательно размещаются общественные зоны с максимальным видовым раскрытием. Номерной фонд занимает средние и нижние уровни с организацией приватных террас. На нижней отметке, у самого моря или вдоль береговой линии, размещаются пляжные зоны и открытые бассейны.

6. Принцип организации пешеходных и транспортных связей

Особую сложность в условиях рельефа представляет организация транспортных и пешеходных коммуникаций. Основной принцип – разделение

транспортных и пешеходных потоков по разным уровням. Транспортные подходы и парковки располагаются на верхних отметках, пешеходные маршруты пронизывают комплекс по вертикали и горизонтали, связывая все функциональные зоны [8].

Вертикальные коммуникации (лифты, эскалаторы, лестницы) дополняются системой пандусов и террас, что обеспечивает доступность среды для маломобильных групп населения. Важно также предусмотреть возможность организации сервисных и хозяйственных связей, не пересекающихся с основными потоками гостей.

Инженерные решения и устойчивое развитие

Инженерная подготовка территории гостиничных комплексов в условиях горного рельефа включает комплекс мероприятий по вертикальной планировке, обеспечивающей отвод поверхностных вод и предотвращение оползневых явлений [9]. Дороги и пешеходные маршруты проектируются с уклонами, допустимыми для безопасного движения (не более 8% для основных проездов и не более 5% для пешеходных путей), при максимальном сохранении природного рельефа и существующих зеленых насаждений.

Для территорий с перепадами высот обязательным является устройство дренажных систем закрытого типа, снижающих уровень грунтовых вод минимум на 2 метра от проектной отметки в зонах капитального строительства. Особое внимание уделяется противооползневым мероприятиям: устройству подпорных стен, террасированию склонов, закреплению грунтов растительностью.

Особое внимание уделяется энергоэффективности комплекса. Использование возобновляемых источников энергии – ветрогенераторов с ортогональным геликоидным ротором (например, модель GRIF НВ3-2КВ с рекомендуемой скоростью ветра от 6 м/с) – позволяет повысить эффективность генерации на 25-30% за счет аэродинамических свойств архитектурной формы. Солнечные батареи, интегрированные в наклонное остекление и ориентированные на южную сторону, также существенно повышают энергоэффективность комплекса [7].

Важным аспектом является также рациональное водопользование: сбор дождевой воды с кровель и террас, ее очистка и использование для полива озеленения и технических нужд. В условиях дефицита пресной воды в Крыму это приобретает особое значение. Системы капельного орошения и подбор засухоустойчивых растений для озеленения позволяют минимизировать потребление воды.

Архитектурно-художественные решения и образ комплекса

Архитектурный образ многоуровневого гостиничного комплекса на рельефе формируется под влиянием нескольких факторов: природного

ландшафта, функциональной структуры, климатических условий и региональных архитектурных традиций [5].

В проектируемом комплексе в Алуште архитектурный образ строится на контрасте и одновременно гармонии с природным окружением. С одной стороны, современные формы, панорамное остекление, динамичные линии фасадов подчеркивают технологичность и высокий уровень комфорта. С другой стороны, террасирование, применение природных материалов, озеленение кровель и вертикальное озеленение фасадов обеспечивают визуальную связь с ландшафтом.

Особую роль играет световой дизайн: в вечернее время подсветка подчеркивает ярусность комплекса, выделяет вертикальные коммуникации и общественные пространства, создавая выразительный силуэт на фоне гор и моря. Важно, что световое оформление учитывает необходимость снижения светового загрязнения и сохранения темного неба для астротуризма, который также развивается в Крыму.

Заключение

Анализ методов и принципов проектирования многоуровневых гостиничных комплексов на рельефе позволяет выделить ряд ключевых положений, определяющих успешность архитектурных решений в сложных природных условиях Южного берега Крыма:

Террасирование как основной прием объемно-планировочной организации позволяет эффективно использовать перепады высот, минимизировать вмешательство в природный ландшафт и обеспечить максимальные видовые характеристики номерного фонда и общественных пространств.

Учет ветрового режима и использование аэродинамических свойств архитектурной формы открывает возможности не только для защиты от неблагоприятных воздействий, но и для генерации энергии. Размещение ветроэнергетических установок в зонах ускоренного потока, формируемого формой здания, повышает эффективность ветрогенерации на 25-30%.

Интеграция архитектуры в природный ландшафт через применение местных материалов, озеленение кровель и террас, повторение естественных форм и силуэтов обеспечивает сохранение уникального облика территории и повышает эстетическую привлекательность комплекса.

Комплексные инженерные решения, включающие вертикальную планировку, дренажные системы, противооползневые мероприятия и использование возобновляемых источников энергии, обеспечивают устойчивость и безопасность комплекса, снижают эксплуатационные расходы.

Выявленные принципы формируют целостную систему проектирования, ориентированную на создание устойчивой,

энергоэффективной и эстетически выразительной среды гостиничного комплекса, гармонично вписанной в уникальный ландшафт Южного берега Крыма. Представленные в статье подходы могут быть применены при проектировании аналогичных объектов в горных прибрежных зонах с учетом их специфических природно-климатических условий.

Список литературы:

1. Горгорова Ю.В. Проектирование гостиниц для природно-климатических условий гор и предгорий Юга России // Инженерный вестник Дона. – 2013. – №4 (27). EDN: SBLLUX
2. Горгорова Ю.В. Особенности архитектурной реконструкции гостиниц в городах Юга России: дис. канд. архитектуры. – СПб., 2005. – 248 с. EDN: NNKEYZ
3. Есаулов Г. В. Архитектура Юга России: от истории к современности : (очерки) : монография. – Москва : Архитектура-С, 2016. – 565, [2] с. : ил., карты, табл., цв. ил. ISBN 978-5-9647-0284-9
4. Зильберова И.Ю., Высоковская Л.В. Особенности проектирования в России // Инженерный вестник Дона. – 2012. – №4-1 (22). – С .116. EDN: PRXMIT
5. Костин А.Д., Ананьин М.Ю. Проектное решение гостиницы в городе Сочи с учётом сейсмоопасности района // Русский журнал строительных наук и технологий. – 2023. – Т. 9. – № 2. DOI: 10.15826/rjcst.2023.2.004 EDN: BEIWLY
6. Лисициан М.В. Архитектурное проектирование жилых зданий : учебник для вузов / М. В. Лисициан, В. Л. Пашковский, З. В. Петунина и др. ; под ред. М. В. Лисициана, Е. С. Пронина. – Москва : Стройиздат, 1990. – 488 с. : ил. – (Спец. «Архитектура»). ISBN 5-274-00894-1
7. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М., Шилкин Н. В. Энергоэффективные здания. – Москва : АВОК-пресс, 2003. – 192, [2] с. : ил., цв. ил., табл. – (Техническая библиотека НП «АВОК»). ISBN 5-94533-007-8
8. Ткачев В.Н. Архитектурный дизайн : функциональные и художественные основы проектирования : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 052400 «Дизайн» / В. Н. Ткачёв. – Москва : Архитектура-С, 2006. – 350 с. : ил., табл., цв. ил. – ISBN 5-9647-0097-7
9. Шевченко Л. П., Горгорова Ю. В. Архитектура гостиниц городов Юга России : рекомендации по реконструкции / Л. П. Шевченко, Ю. В. Горгорова ; ФГОУ ВПО «Южный федеральный университет», Институт архитектуры и искусств, Северо-Кавказский научный центр высшей школы, Южное региональное отделение Российской академии архитектуры и строительных наук. – Ростов-на-Дону : Изд-во СНКЦ ВШ, 2007. – 85 с. : ил., цв. ил. – ISBN 978-587872-365-7

УДК 725

Цыбульникова Мария, Вешняков А. В.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

АРХИТЕКТУРНО-КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОСТИНИЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ В СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗОНЕ (НА ПРИМЕРЕ Г. СОЧИ)

Аннотация. В статье рассматриваются архитектурно-конструктивные принципы проектирования гостиничных комплексов в условиях сейсмически активных районов на примере города Сочи. Целью исследования является систематизация подходов к обеспечению сейсмостойкости крупных туристических объектов с учетом сложных инженерно-геологических условий, рельефа и дополнительных динамических нагрузок. На основе анализа нормативной документации, отечественного и зарубежного опыта выявлены ключевые градостроительные, объемно-планировочные и конструктивные приемы, определяющие надежность и безопасность гостиничной архитектуры в сейсмоопасных прибрежных зонах.

Ключевые слова: сейсмическое районирование, гостиничный комплекс, сейсмостойкое строительство, архитектурно-конструктивные решения, каркасные здания, сейсмоизоляция, город Сочи.

Введение

Строительство и реконструкция гостиничных комплексов в сейсмоопасных зонах Российской Федерации — одна из ключевых задач архитектурно-строительной отрасли. Город Сочи, расположенный на Черноморском побережье Кавказа, наряду с Крымом, Камчаткой и Сахалином, относится к территориям с повышенной сейсмической активностью. Согласно картам общего сейсмического районирования (ОСР-2014), для Сочи характерна сейсмичность площадок 7, 8 и 9 баллов [2]. При этом регион отличается высоким туристическим потенциалом, что определяет необходимость строительства новых современных гостиничных комплексов, отвечающих самым строгим требованиям безопасности.

Особую актуальность приобретает задача проектирования гостиничных комплексов на прибрежных склоновых участках, поскольку именно эти территории обладают наибольшей живописностью и туристической привлекательностью. Проектируемые гостиничные комплексы в Сочи ориентированы на создание безопасной и комфортной среды с учетом 8–9-балльной сейсмики, сложного рельефа (предгорья Кавказских гор) и близости моря.

Методы проектирования и исследования

Исследование архитектурно-конструктивных решений гостиничных комплексов в сейсмической зоне основано на комплексном методологическом подходе, сочетающем теоретический анализ, проектное моделирование и сравнительное исследование существующих объектов. В качестве основного метода использован анализ нормативной документации (СП 14.13330.2018, СП 118.13330.2022, СП 257.1325800.2020) и публикаций о реализованных объектах (гостиничные комплексы в Сочи, Геленджике, Анапе). Дополнительно применялись методы натурного обследования участков проектирования, а также расчетно-аналитические методы для оценки совместного действия сейсмических и ветровых нагрузок.

Научная новизна исследования заключается в комплексном анализе архитектурно-конструктивных принципов проектирования гостиничных комплексов в сейсмической зоне применительно к специфике Черноморского побережья Кавказа. В работе систематизированы решения, позволяющие обеспечить сейсмостойкость зданий в условиях сложного рельефа, близости моря и дополнительных нагрузок от ветроэнергетических установок. Новизна исследования также состоит в выявлении принципа «динамической совместимости», при котором форма здания, его конструктивная схема и размещение инженерного оборудования рассматриваются как единая колебательная система [4].

Принципы проектирования гостиничных комплексов в сейсмической зоне

Анализ проектных решений позволяет выявить систему принципов, определяющих организацию сейсмостойких гостиничных комплексов и их функциональную надежность.

1. Принцип учета сейсмического микрорайонирования площадки

Определяющим фактором является выбор площадки строительства с учетом актуальных карт ОСР-2014 и данных инженерно-геологических изысканий. Согласно СП 14.13330, для площадок с сейсмичностью 8–9 баллов обязательным является уточнение расчетной сейсмичности по результатам сейсмологического и геологического микрорайонирования [1]. Важно оценить не только интенсивность в баллах, но и спектральный состав ожидаемых колебаний, тип грунтов, их склонность к резонансу и оползневым процессам.

Для Сочи ключевым является анализ переотложенных грунтов на склонах и оползневых процессов. Как показывает практика, резонансный анализ каркасного здания при близости собственных частот к частоте колебаний грунта может выявить необходимость корректировки конструктивной схемы [6].

2. Принцип рациональной объемно-планировочной схемы

Опыт проектирования сейсмостойких гостиничных комплексов показывает, что определяющим фактором является симметрия в плане и равномерное распределение жесткостей и масс по высоте. Нормы предписывают отдавать предпочтение зданиям простой формы в плане (квадрат, прямоугольник) без резких перепадов этажности и консольных выступов [5].

В условиях прибрежного склонового рельефа оптимальной является террасная схема застройки, где каждый объем имеет простую форму, а лестнично-лифтовые узлы размещены в ядрах жесткости, равномерно распределенных по этажам. Террасирование позволяет снизить риск неравномерных деформаций основания за счет повторения естественного уклона. При этом категорически не рекомендуется использовать асимметричные или сложнокриволинейные формы, которые создают кручения при сейсмическом воздействии.

3. Принцип конструктивной системы и жесткости

Для гостиничных комплексов в сейсмических районах предпочтительны каркасно-монолитные схемы с монолитными ядрами жесткости, включающими эвакуационные лестницы и лифтовые шахты. Монолитные железобетонные перекрытия толщиной 200–300 мм работают как жесткие диафрагмы, перераспределяя горизонтальные нагрузки. Колонны армируются с повышенной объемной арматурой для обеспечения пластичности, шаг хомутов не должен превышать половины наименьшего размера поперечного сечения колонны [1].

Фундаменты проектируются свайными с монолитным ростверком. В условиях Сочи с его частыми переотложенными грунтами применяются буронабивные сваи диаметром от 400 мм, глубиной 12–16 м, с расчетом на совместные вертикальные и горизонтальные нагрузки. Для зданий высотой более 30 м предусматриваются сейсмические швы, разделяющие здание на блоки длиной не более 60 м.

4. Принцип учета дополнительных динамических нагрузок

Гостиничные комплексы на побережье испытывают не только сейсмические, но и существенные ветровые нагрузки. Для высотных зданий ветровая нагрузка становится сопоставимой со сметной сейсмической. В СП 14.13330 и СП 20.13330 предусмотрены сочетания нагрузок, требующие расчета на совместное действие сейсмики и ветра [1].

При размещении на кровлях зданий ветроэнергетических установок (ВЭУ) требуется учитывать их динамическое влияние на общую систему. ВЭУ генерируют дополнительные вибрации, которые при совпадении с собственными частотами здания (обычно 1–3 Гц) могут усиливать сейсмический отклик. Поэтому для высотных гостиниц рекомендуется применять ВЭУ с ортогональным геликоидным ротором, которые имеют

повышенную демпфирующую способность и не требуют жесткой ориентации по потоку [10].

5. Принцип конструктивной и отделочной надежности в прибрежной зоне

Близость моря в сочетании с сейсмикой требует применения антикоррозионной защиты арматуры и закладных деталей. Для фасадов оптимальны вентилируемые системы с облицовкой из керамогранита или алюминиевых панелей – они легкие и пластичные. Тяжелые и хрупкие материалы (натуральный камень без крепления, керамическая плитка на клею) опасны при обрушении.

Внутренние перегородки рекомендуется выполнять из гипсокартона на металлическом каркасе, а не из кирпича. Все элементы интерьера (люстры, подвесные потолки, кондиционеры) должны иметь надежные анкерные крепления с запасом не менее 2 по расчету на сейсмику.

Инженерные решения и устойчивое развитие

Инженерная подготовка территории гостиничного комплекса в сейсмической зоне включает комплекс мероприятий по вертикальной планировке, обеспечивающей отвод поверхностных вод и предотвращение оползневых явлений [9]. Особое внимание уделяется дренажным системам, снижающим уровень грунтовых вод минимум на 2 метра от проектной отметки. При сейсмичности 8–9 баллов обязательны расчеты на сейсмостойкость подпорных стен и укрепление склонов георешетками.

Системы жизнеобеспечения (трубопроводы, воздуховоды, кабельные линии) должны быть гибкими и иметь компенсаторы. Рекомендуется использовать полимерные трубы в местах вводов и перехода через сейсмические швы. В котельных и ИТП оборудование устанавливается на виброизолирующие основания с ограничителями перемещений.

Энергоснабжение комплекса предусматривает два независимых ввода с автоматическим резервом. Ветроэнергетические установки подключаются через сетевой инвертор с функцией синхронизации, но их работа в сейсмическом режиме требует отдельного расчета на динамическую устойчивость [10].

Архитектурно-художественные решения и образ комплекса

Архитектурный образ сейсмостойкого гостиничного комплекса на Черноморском побережье формируется под влиянием двух противоборствующих факторов: требований безопасности (симметрия, простые формы) и курортной эстетики (живописные виды, террасы, легкость). Компромисс достигается за счет террасной композиции, где каждый объем прост, но они расположены на разных уровнях, создавая динамичный силуэт [5].

В проектируемых комплексах Сочи применяются монолитные ядра жесткости, «одетые» в легкие навесные фасады из керамогранита. Панорамное остекление выполняется из многослойных стеклопакетов с ламинированной пленкой (триплекс) – при разрушении стекла не рассыпаются на острые осколки. Озеленение эксплуатируемой кровли не только улучшает микроклимат, но и добавляет дополнительную массу, что учитывается в расчете сейсмических нагрузок (коэффициент сочетания 0,5 к полезной нагрузке).

Заключение

Анализ архитектурно-конструктивных особенностей проектирования гостиничных комплексов в сейсмической зоне позволяет выделить ряд ключевых положений, определяющих успешность решений в условиях Черноморского побережья Кавказа.

1. Обязательное уточнение расчетной сейсмичности площадки по данным микрорайонирования с учетом локальных грунтовых и тектонических условий.
2. Применение симметричных объемно-планировочных схем, предпочтительно террасных, с равномерным распределением жесткостей и масс.
3. Использование каркасно-монолитных конструкций с ядрами жесткости, свайных фундаментов и сейсмических швов.
4. Расчет на совместное действие сейсмических и ветровых нагрузок, а также на динамическое влияние размещаемых на здании ветроэнергетических установок.
5. Обеспечение антикоррозионной защиты конструкций в прибрежной зоне и применение легких, пластичных отделочных материалов.
6. Проектирование инженерных систем с гибкими вставками, виброизоляцией оборудования и дополнительным креплением ненесущих элементов.

Выявленные принципы формируют целостную систему проектирования, ориентированную на создание безопасной, надежной и архитектурно выразительной среды гостиничного комплекса в сейсмоопасных прибрежных зонах. Представленные в статье подходы могут быть применены при проектировании аналогичных объектов в Сочи, Геленджике, Анапе и других сейсмических районах России.

Список литературы:

1. СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах». Актуализированная редакция СНиП II-7-81* (утв. приказом Минстроя России от 24.05.2018 № 309/пр). – Текст : электронный // СПС «ГАРАНТ». – URL: https://base.garant.ru/71985096/ (дата обращения: 07.06.2026).

2. Уломов В.И., Богданов М.И., Пустовитенко Б.Г. и др. Анализ сейсмической опасности Северного Кавказа и адаптация полученных оценок к комплекту карт ОСР-2014 // Инженерные изыскания. – 2015. – № 13. – С. 12–27. EDN: VHGDUH

3. Костин А.Д., Ананьин М.Ю. Проектное решение гостиницы в городе Сочи с учетом сейсмоопасности района // Русский журнал строительных наук и технологий. – 2023. – Т. 9. – № 2. DOI: 10.15826/rjcst.2023.2.004 EDN: BEIWLY

4. Зильберова И.Ю., Высоковская Л.В. Особенности проектирования в России // Инженерный вестник Дона. – 2012. – №4-1 (22). – С. 116. EDN: PRXMIT

5. Горгорова Ю.В. Особенности архитектурной реконструкции гостиниц в городах Юга России: дис. … канд. архитектуры. – СПб., 2005. – 248 с. EDN: NNKEYZ

6. Хазов П. А., Цветнова Л. Ю., Гордеевцева А. М., Сахарова Д. В. Динамический анализ каркасного высотного здания в г. Иркутске при ветровых и сейсмических воздействиях // Приволжский научный журнал. – 2021. – № 4 (60). – С. 48–55. EDN: XVAPCD

7. Костин А. Д., Ананьин М. Ю. Проектное решение гостиницы в городе сочи с учётом сейсмоопасности района // Russian Journal of Construction Science and Technology. – 2023. – Т. 9. – Т. 2. – 0902003. DOI 10.15826/rjcst.2023.2.004.

8. Шалбина Н.Ю. Высотное здание апарт-отеля с подземной автостоянкой в условиях сейсмического воздействия: выпускная квалификационная работа. – СПб.: СПбПУ, 2025. DOI 10.18720/SPBPU/3/2025/vr/vr25-3274

9. Шевченко Л. П., Горгорова Ю. В. Архитектура гостиниц городов Юга России : рекомендации по реконструкции / Л. П. Шевченко, Ю. В. Горгорова ; ФГОУ ВПО «Южный федеральный университет», Институт архитектуры и искусств, Северо-Кавказский научный центр высшей школы, Южное региональное отделение Российской академии архитектуры и строительных наук. – Ростов-на-Дону : Изд-во СНКЦ ВШ, 2007. – 85 с. : ил., цв. ил. ISBN 978-587872-365-7

10. Бубенчиков А.А., Сикорский С.П., Кулак К.С. и др. Ветроустановки с ортогональным ротором: обзор основных проблем, целесообразность применения в условиях слабого ветрового потока и пути совершенствования их конструкции // Молодой ученый. – 2016. – № 22-3 (126). – С. 18–22. EDN: WYINYD

ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ..... 3

Жагрин В. А., Орлов Д. С.

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ ВЫБОРЕ МАТЕРИАЛА ДЛЯ ПОСТРОЙКИ 3

Жагрин В. А., Орлов Д. С.

ИЗУЧЕНИЕ ПОДГОТОВКИ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ К РАБОТЕ В РАМКАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЯ 10

Долгова Л. В., Титова Е. В.

МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГРАФИЧЕСКОЙ СРЕДЫ GNOME В ОС АЛЬТ ПОСРЕДСТВОМ МЕХАНИЗМОВ БЛОКИРОВКИ DCONF 19

Олейник Д. П.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛЕССОВЫХ ГРУНТАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТЕХНОГЕННОГО ОБВОДНЕНИЯ..... 31

Щербаков А. В.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕГАЗОВЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ С УЧЁТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК ПОСЛЕ ЗАМЕНЫ МАСЛЯНЫХ АППАРАТОВ НА ОРУ-220 КВ РЯЗАНСКОЙ ГРЭС..... 36

Трофимов И. А.

ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНО КВАНТОВОГО ОБМЕНА В КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ: ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КВАНТОВЫХ СЕТЕЙ..... 46

Трофимов И. А.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ МОБИЛЬНЫХ И БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ 51

Gurbanmammedov Charyyar, Cherkezova Ogulbossan, Esenova Leyli, Rustamjanova Aziza

FARADAY'S LAW OF INDUCTION AND MEASUREMENT OF INDUCED EMF..... 57

Андреева Н. Н., Голованов Е. В.

ЭВОЛЮЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ШАХТНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ..... 79

Ломовацкий И. Е.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЧАСОВЫХ И ПОМЕСЯЧНЫХ ТАРИФНЫХ ПАРАМЕТРОВ РОЗНИЧНОГО РЫНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 86

Хайруллина Г. Ф., Набиев Д. Т., Фатхелисламов А. Ф.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАЩИЩЁННОГО ПОЧТОВОГО КЛИЕНТА КРИПТОАРМ ГОСТ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЕРЕПИСКИ 95

Ушаков Д. П., Кочемиров М. А.

SKIA И IMPELLER: АНАЛИЗ ПРИЧИН И ПОСЛЕДСТВИЙ ПЕРЕХОДА FLUTTER НА СОБСТВЕННЫЙ ГРАФИЧЕСКИЙ ДВИЖОК..... 101

Лу Мэнфань, Ван Цзяжуй

ОБРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ В ЭПОХУ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ 108

Степанов М. Д.

ИССЛЕДОВАНИЕ РИСКОВ ЗАПУСКА КОНТЕЙНЕРОВ С ПРИВИЛЕГИЯМИ ROOT 113

Яцкова Д. А., Сандаков В. Д.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЗАЩИЩЁННОСТИ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ В РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ 119

Чуликова А. А.

ПРИМЕНЕНИЕ RPA-ПЛАТФОРМ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ПОРТАЛОВ 126

Яцкова Д. А., Сандаков В. Д.

ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ BIG DATA В ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКЕ..... 131

Руссу О. С.

УНИКАЛЬНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ РОССИИ: АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ 138

Шлионская Ю. Д., Емцов И. А.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ С САМОНАСТРАИВАЮЩИМСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ РАСЦЕПИТЕЛЕМ 144

Гаранькин А. А.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ 151

Гаранькин А. А.

ОРГАНИЗАЦИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ КАМЕННЫХ ЗДАНИЙ В УСЛОВИЯХ СТЕСНЕННОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ 156

Шестов А. В., Комзалов В. И., Павлова А. С., Мартынов М. В.

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ 161

Гайфуллин С. Р., Сандаков В. Д.

ОТ ПОЛЕВОЙ ШИНЫ ДО MQTT: ЭВОЛЮЦИЯ ПРОТОКОЛОВ ОБМЕНА ДАННЫМИ В ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ . 167

Гайфуллин С. Р., Сандаков В. Д.

ПРИМЕНЕНИЕ LPWAN-СЕТЕЙ (LORAWAN, NB-IOT) ДЛЯ МОНИТОРИНГА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ, ЖКХ И СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ 175

Цой Д. О.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ YOLOV8 ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ НА РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКАХ 183

Курбатова М. А., Копылова Я. А.

СОВРЕМЕННЫЕ АРХИТЕКТУРНЫЕ ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ..... 195

Григорян А. Г., Галицкий М. В.

МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО СБОРА ЗАПИСЕЙ О СОБЫТИЯХ НА ОСНОВЕ АРХИТЕКТУРЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ 200

Кочанов Д. С., Ризванов Д. А.

МОДЕЛИ, АРХИТЕКТУРА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СТЕК ДЛЯ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ НЕЧЁТКИМИ ЭКСПЕРТНЫМИ СИСТЕМАМИ 214

Шатохин В. Н.

РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СТЕКА ДЛЯ КЛИЕНТ-СЕРВЕРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ 222

Козырев Н. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЛОКАЛЬНОСТИ ДАННЫХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КЭШ-ПАМЯТИ ПРОЦЕССОРА ПРИ ОБРАБОТКЕ КОЛЛЕКЦИЙ В SWIFT НА АРХИТЕКТУРЕ APPLE SILICON 229

Газизов А. Р., Кохан Д. С.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕБ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ЗАКАЗОВ В ОПТОВОЙ ТОРГОВЛЕ БЫТОВОЙ ХИМИЕЙ 239

Еремишин Н. Н.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СКАНИРОВАНИЯ ДВУМЕРНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ КОДОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ И ПРЕДОБРАБОТКИ 244

Кондратьев В. Ю., Сафронов Н. В.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДСИСТЕМА КОНТРОЛЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ КЛЮЧЕВЫХ ОПЕРАЦИЙ НА ПЛАТФОРМЕ 1С:ДОКУМЕНТООБОРОТ НА ОСНОВЕ МЕТОДИКИ APDEX 254

Хисамутдинов А. И., Имангулов В. Х., Фархутдинов И. М.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ РАБОТЫ КУЛЬТИВАТОРА С ПРУЖИННЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ НА БАЗЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ARDUINO 260

Самаринов Л. А.

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ ПРИ АСИНХРОННОЙ ТЯГЕ СКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА 265

Зиедан Шади Ибрагим Эльсаид Ахмед

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ТРЕКИНГА МАРШРУТОВ НА ОСНОВЕ OPENVINS 270

Ерохин А. С.

МЕТОДОЛОГИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ МНОЖЕСТВЕННОЙ РЕГРЕССИИ 277

Борискин М. А.

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ ФИТНЕС-РЕКОМЕНДАЦИЙ НА ОСНОВЕ ДИНАМИКИ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ 284

Елисеев Эдуард

СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ

АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ: ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ 289
Коняев Е. С., Жданов В. А.
ПАРАДИГМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОГО И АГЕНТНОГО ПОДХОДОВ 303
Рогов И. А.
ВЛИЯНИЕ ТЕКСТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СУГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА НА АНИЗОТРОПИЮ ИХ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ 308
Сергеев С. С.
КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИТОКА РЕКИ К СТВОРУ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС ПО ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ТУВЫ 314
Беккер Б. Н.
ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ВЫСОКОМАРГАНЦЕВЫХ СТАЛЕЙ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАСТИН НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА СО ВСТАВКОЙ ИЗ ТВЕРДОГО СПЛАВА..... 321
Копырина Е. А.
УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВ БЕТОНА ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ДОБАВОК..... 327
Скалинский Р. А.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КЛАССИЧЕСКИХ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ ОБХОДА ПРЕПЯТСТВИЙ АВТОНОМНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ПЛАТФОРМОЙ..... 337
Скалинский Р. А.
ПРОБЛЕМА ПЕРЕХОДА ОТ СИМУЛЯЦИИ К РЕАЛЬНОЙ АВТОНОМНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ПЛАТФОРМЕ 353
Игнатьев И. К.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК СЕРВЕРНЫХ СТОЕК ЦЕНТРА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ 360
Дувалов В. С.
ПРИМЕНЕНИЕ NER В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ РЕЗЮМЕ 367
Мирхайдарова В. Р.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ УГЛЕВОДОРОДОВ: ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ .. 372

Миссюра В. В., Капущенко Р. С.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ АНАЛИЗА И КЛАСТЕРИЗАЦИИ КОММЕНТАРИЕВ ПОД ИНФОРМАЦИОННЫМ КОНТЕНТОМ 375

Шелопаев Л. Л.

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОИСКОВЫХ ЗАПРОСОВ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТОВАРА 378

Савин А. А.

ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ИЗ СПЛОШНОГО МАТЕРИАЛА ПО МЕТОДУ КОЛЬЦЕВОГО СВЕРЛЕНИЯ 386

Кашин М. К.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПАКОВКИ И МЕТОДИКИ ТРАНСПОРТИРОВКИ КАРТИН С НЕВЫСОХШИМ ЖИВОПИСНЫМ СЛОЕМ..... 394

Щербаков А. В.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЗАМЕНЫ МАСЛЯНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ НА ЭЛЕГАЗОВЫЕ НА ОРУ-220 кВ РЯЗАНСКОЙ ГРЭС 400

Федорова Д. А., Шарапов А. А.

ФРОНТЕНД-РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ПОРТФОЛИО ОБУЧАЮЩЕГОСЯ 410

Дровянников А. А., Фокина В. А.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЖЕСТКИХ ПОПЕРЕЧИН КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ 417

Гречишников В. А., Дреев Н. В.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ НАРУЖНОЙ РЕЗЬБЫ 422

Ильинская О. И., Поперечный С. С.

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ 427

Корендясова В. В.

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЛЫМИ КОМПЛЕКСАМИ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ 6D-МОДЕЛИРОВАНИЯ 434

Козлов Н. С.

ВЛИЯНИЕ DDoS-АТАК НА ВРЕМЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ И ПЕРЕРЕГУЛИРОВАНИЕ В ЗАМКНУТЫХ КОНТУРАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ РОБОТАМИ..... 439

Козлов Н. С.

ОЦЕНКА ДЕГРАДАЦИИ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ DDOS-АТАКЕ НА КАНАЛЫ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕМЕТРИИ 444

Чернов М. Н., Кочинов Ю. А.

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ КУРЬЕРОВ НА ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТЕ..... 449

Кузибаев Д. И.

АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФУНДАМЕНТОВ 454

Кузибаев Д. И.

ИСПЫТАНИЯ АРМИРОВАННЫХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ 460

Кузибаев Д. И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАДОК ФУНДАМЕНТОВ НА КОМБИНИРОВАННО АРМИРОВАННОМ ОСНОВАНИИ 465

Анаджиб Араби Адум

ЦИФРОВИЗАЦИЯ В ЧАДЕ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ 470

Полозков А. И.

УПРАВЛЕНИЕ РАЗРАБОТКОЙ КОНФИГУРАЦИИ БИТ.ЦЕНТР УПРАВЛЕНИЯ ЛИЗИНГОМ НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ 1С:ПРЕДПРИЯТИЕ: МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ПРАКТИКА 482

Алланазарова Лейли, Мандарова Огулсурай, Одеева Огулшат, Черрикова Гулалек

ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ 490

Таганов Чарымырат

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ..... 498

Мишина Ю. В.

СРЕДСТВА РЕГИСТРАЦИИ КОЛЕБАНИЙ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ И ОЦЕНКИ ИХ ВЛИЯНИЯ НА ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ 508

АРХИТЕКТУРА И ДИЗАЙН 517

Келехсашвили Р. Д., Колодин К. И.

АДАПТАЦИЯ ДЕРЕВА КАК СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЗАСТРОЙКИ В РОССИИ 517

Загнетина Л. Д., Бойцова Д. В.

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕЧЕБНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ 525

Вайтенс А. Г., Рыбалко В. С.

РАЗВИТИЕ ЛЕНИНСКОГО РАЙОНА КЕРЧЕНСКОГО ПОЛУОСТРОВА В XX ВЕКЕ: ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЕ, АГРАРНЫЕ И ИНФРАСТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ 534

Стрелкова Е. Д.

АНАЛИЗ АРХИТЕКТУРНЫХ ПОДХОДОВ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ САНАТОРНЫХ И БАЛЬНЕОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ 542

Цыбульникова Мария, Вешняков А. В.

МЕТОДЫ И ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ ГОСТИНИЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА РЕЛЬЕФЕ (НА ПРИМЕРЕ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА) 547

Цыбульникова Мария, Вешняков А. В.

АРХИТЕКТУРНО-КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОСТИНИЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ В СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗОНЕ (НА ПРИМЕРЕ Г. СОЧИ) 554

ОГЛАВЛЕНИЕ 560