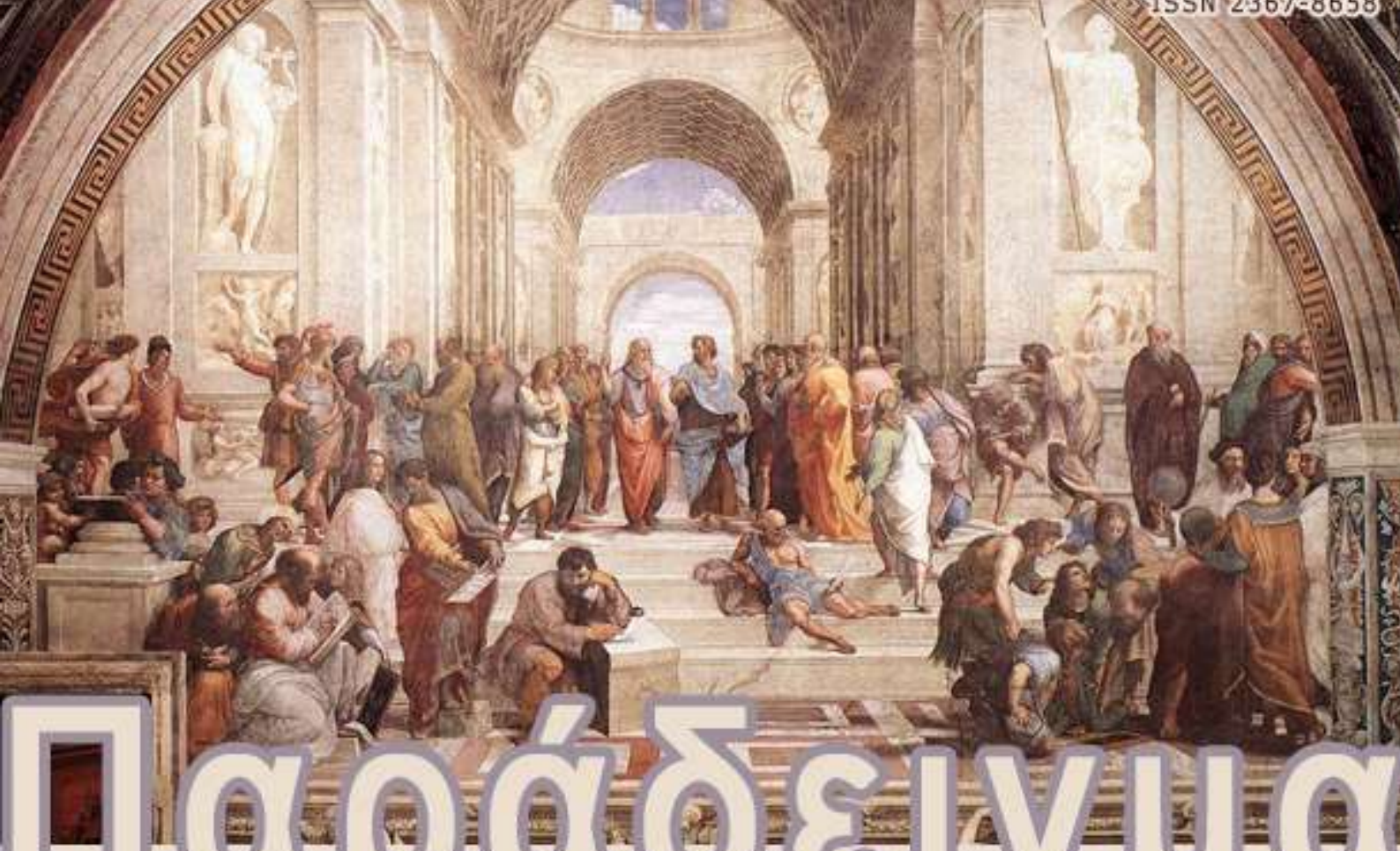
ISSN 2367-8658



Παράδειγμα

Парадигма

Paradigma

№5, 2026
Часть 1
Технологии

Електронно
научно
списание

Парадигма
Електронно
научно списание

БРОЙ 5/2026
Часть 1

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

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, Республика 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, Республика 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, республика 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

УДК 625.7:658.5

Минаков А. С.[1], Машков П. В.[2]
[1] Академия дорожного хозяйства, Москва, Россия
[2] Российский университет транспорта, Москва, Россия

ПРОЕКТ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ, КАЧЕСТВОМ, СРОКАМИ, РЕСУРСАМИ И БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Аннотация: Проект производства работ (ППР) рассматривается как ключевой организационно-технологический документ, обеспечивающий управляемость технологических процессов дорожного строительства по параметрам качества, сроков, ресурсов и безопасности. Предложена модель «ППР-управления», основанная на процессном и риск-ориентированном подходах и включающая: декомпозицию работ на технологические операции; привязку контрольных точек качества и безопасности к операциям; календарно-ресурсное планирование с учетом критического пути; регламент управления несоответствиями и отклонениями сроков/ресурсов. Обоснована необходимость интеграции решений по охране труда и промышленной безопасности в ППР, а также цифровой прослеживаемости данных контроля (журнал, протоколы, фотофиксация, реестр несоответствий). Показано, что «живой» ППР снижает вероятность дефектов и инцидентов, уменьшает потери времени и материалов и повышает доказательность исполнительной документации.

Ключевые слова: ППР; организация строительства; технологические процессы; технологические карты; управление сроками; управление ресурсами; строительный контроль; охрана труда; промышленная безопасность; риск-ориентированный подход.

1. Введение

Управление строительными работами на объектах дорожного строительства характеризуется высокой сложностью вследствие параллельности процессов, зависимости от погодных условий, необходимости непрерывности отдельных операций (например, при устройстве покрытий), а также повышенных рисков безопасности при работе в зоне движения транспорта и при использовании механизированных комплексов. Существенная доля дефектов и срывов сроков на практике обусловлена организационно-технологическими причинами: нарушением технологических режимов, несогласованностью потоков ресурсов, несвоевременным контролем критических операций и формальным включением мероприятий по безопасности.

В системе организационно-технологической подготовки производства ППР занимает центральное место как документ, фиксирующий обоснованные организационно-технологические решения, направленные на обеспечение технологичности и безопасности работ. В нормативных источниках ППР рассматривается как основной организационно-технологический документ,

определяющий решения по эффективному и безопасному производству работ (СП 48.13330.2019 «Организация строительства») [1].

Существенную роль в ППР занимают решения по охране труда и промышленной безопасности. Порядок разработки и требования к содержанию таких решений в ПОС и ППР регламентированы СП 12-136-2002, а общие требования безопасности труда в строительстве установлены СНиП 12-03-2001. Эти документы формируют обязательную основу для планирования безопасных условий выполнения работ и контроля соблюдения мер безопасности [2, 3].

Цель исследования — разработка структурированной модели ППР как инструмента управления технологическими процессами, качеством, сроками, ресурсами и безопасностью при строительстве автомобильных дорог. Задачи исследования включают: (1) определение функциональной роли ППР в управлении дорожным строительством; (2) формирование рекомендуемого состава разделов ППР; (3) разработку системы контрольных точек качества и безопасности; (4) описание механизмов управления отклонениями по срокам и ресурсам; (5) обоснование прослеживаемости данных контроля.

2. Материалы и методы

Методологическая база исследования включает нормативно-правовой анализ требований к организации строительства и безопасности труда, процессный подход к управлению производством работ и риск-ориентированную приоритизацию контроля по критичности операций. В качестве практического инструмента использовано организационно-технологическое моделирование, предусматривающее декомпозицию работ на операции, построение календарно-ресурсной модели и привязку контрольных мероприятий к технологической последовательности [1, 4].

При формировании управленческой модели ППР использовалась упрощенная матрица рисков, основанная на оценке вероятности отклонений и тяжести последствий. Высокорисковые операции требуют усиленного контроля, применения «стоп-правил» и корректирующих действий до закрытия слоя последующими работами. Данные контроля рассматриваются как управленческий ресурс, обеспечивающий принятие решений по технологии, срокам, ресурсам и безопасности [4].

3. Результаты

3.1. Функциональная модель ППР в управлении дорожным строительством

ППР целесообразно рассматривать как «центр управления» объектом, интегрирующий пять контуров: (1) технологию выполнения операций; (2) ресурсы (персонал, техника, материалы, логистика); (3) сроки (календарная модель и критический путь); (4) контроль качества (параметры, методы, критерии допуска); (5) безопасность (мероприятия, схемы организации движения, допуски, средства защиты). Такая интеграция позволяет перевести

ППР из статичного документа в механизм управления производством работ с регламентированными действиями при отклонениях [1].

3.2. Рекомендуемая структура ППР для строительства автомобильных дорог

В условиях дорожного строительства ППР рекомендуется формировать в виде взаимосвязанных блоков, обеспечивающих полноту управленческих решений:

Организационные решения: деление на захватки (участки), очередность работ, временная инфраструктура, складирование.

Технологическая часть: технологические карты на основные виды работ, требования к подготовке фронта, режимы и параметры.

Управление сроками: календарный график по захваткам и сменам, критические операции, технологические «окна», резервы.

Управление ресурсами: ведомость машин/механизмов и персонала, баланс производительности, графики поставок материалов.

Управление качеством: контрольные точки, методы контроля, критерии приемки операций, порядок устранения несоответствий.

Охрана труда и промышленная безопасность: организационные и технические меры, схемы ОДД, допуски, СИЗ, контроль соблюдения [2, 3].

3.3. Матрица управления «операция – качество – сроки – ресурсы – безопасность»

Для обеспечения управляемости в ППР предлагается единообразное описание каждой ключевой операции по структуре: (1) границы операции и результат; (2) критические параметры качества; (3) ресурсы и производительность; (4) контроль качества (метод, частота, критерии допуска); (5) риски и меры безопасности; (6) управленческая реакция при отклонениях (останов, корректировка технологии, повторный контроль). Такой формат обеспечивает сопоставимость данных и формирует основу для оперативного управления.

Процесс/ операция	**Ключевые параметры**	**Ресурсы**	**Контроль качества**	**Риски/безопасность**	**Документ в ППР**
Устройство земляного полотна		Самосвалы; бульдозер/грейдер; катки; геодезия	Измерения по захваткам; протоколы; геодезический контроль	Наезд техники; работа на откосах; пыль; ограничение зоны	Техкарта; схема движения; план контроля
Устройство основания (ЩПС/щебень)	Толщина; уплотнение; ровность; поперечный уклон	Грейдер; катки; поливомоечная машина; лаборатория	Ведомости измерений; контроль уплотнения; приемка слоя	Движение техники; пылеобразование; шум; СИЗ	Техкарта; ведомость КТ; акты скрытых работ

Укладка асфальтобетона	Температура непрерывность; режим уплотнения; ровность	Асфальтоукладчик; катки; самосвалы; лаборатория	Контроль температуры; кернение/образцы; контроль швов	Ожоги; горячие смеси; транспортные риски; сигнальщики	Техкарта; схема ОДД; план контроля
Организация дорожного движения в зоне работ	Схемы; знаки; ограждения; освещение	Знаки; барьеры; конусы; сигнальные средства; персонал	Осмотр по чек-листу; фиксация замечаний	Риск ДТП; наезд на работников; видимость; инструктаж	Схема ОДД; ППР; журналы инструктажа

3.4. Контрольные точки качества и безопасности (операционный уровень)

Для дорожных работ в ППР рекомендуется закреплять минимальный набор контрольных точек, обеспечивающих управляемость критических операций: входной контроль материалов; земляное полотно; основание; покрытие; водоотвод; скрытые работы. Для каждой контрольной точки задаются контролируемые параметры, метод контроля, периодичность, ответственные лица и критерий допуска к следующей операции. Параллельно формируется контур контроля безопасности: состояние ограждений и схем ОДД, безопасные маршруты техники, допуски к работам повышенной опасности и предсменный контроль техники.

3.5. Регламент управления отклонениями: качество, сроки, ресурсы, безопасность

ППР должен предусматривать единый порядок действий при отклонениях. При несоответствиях качества выполняются: классификация (критическое/значимое/незначительное), корректирующее действие, повторный контроль и допуск/запрет закрытия слоя. При отклонениях по срокам анализируется причина (ресурс, погода, логистика, технология) и выполняется перебалансировка ресурсов, изменение сменности, корректировка календарной модели. При дефиците ресурсов применяется приоритизация по критическому пути и усиление механизации на критических участках. При выявлении опасных условий предусматривается немедленная приостановка работ до устранения опасности с фиксацией в журнале и контролем выполнения мер [1, 2].

4. Обсуждение

Сформированная модель ППР показывает, что наибольшая результативность достигается при переходе от «документарного» подхода к операционному управлению. Технологические карты задают параметры и режимы, календарно-ресурсная модель обеспечивает выполнимость сроков, а контрольные точки качества и безопасности встраиваются в технологическую последовательность. Важнейшим условием является интеграция решений по охране труда и промышленной безопасности в ППР как обязательного элемента организационно-технологической документации [1].

Дополнительным фактором повышения эффективности ППР является цифровая прослеживаемость данных контроля: электронный журнал работ, лабораторные протоколы с привязкой к участку и времени, фотофиксация скрытых работ и реестр несоответствий. Прослеживаемость формирует доказательную базу и снижает транзакционные издержки управления (поиск информации, повторные проверки, разрешение спорных ситуаций) [1, 4].

5. Выводы

ППР является ключевым организационно-технологическим документом, обеспечивающим управляемость дорожного строительства по параметрам технологии, качества, сроков, ресурсов и безопасности.

Эффективная структура ППР должна включать технологические карты, календарно-ресурсное планирование, контрольные точки качества и безопасности и регламент управления отклонениями.

Интеграция решений по охране труда и промышленной безопасности в ППР является обязательным условием безопасного производства работ и должна выполняться в соответствии с действующими нормативными документами [2, 3].

Применение матрицы «операция–качество–сроки–ресурсы–безопасность» и цифровой прослеживаемости данных контроля повышает доказательность исполнительной документации и снижает риск дефектов, потерь времени и инцидентов.

Список литературы:

1. СП 48.13330.2019. Организация строительства (определение ППР и организационно-технологической документации). [Электронный ресурс]. https://meganorm.ru/Data2/1/4293722/4293722445.htm (дата обращения: 14.03.2026).

2. СП 12-136-2002. Решения по охране труда и промышленной безопасности в проектах организации строительства и проектах производства работ. [Электронный ресурс]. https://meganorm.ru/ Data2/1/4294845/ 4294845726.pdf (дата обращения: 14.03.2026).

3. СНиП 12-03-2001. Безопасность труда в строительстве. Часть 1. Общие требования. [Электронный ресурс]. https://www.gostrf.com/normadata/ 1/4294848/4294848070.htm (дата обращения: 13.3.2026).

4. ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use. [Электронный ресурс]. https://www.iso.org/standard/63787.html (дата обращения: 13.03.2026).

УДК 004.056

Козырев В. С., Давыдов В. В., Егорова П. Ю.
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

SBOM В ПРОЦЕССАХ БЕЗОПАСНОЙ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ: НОРМАТИВНЫЙ КОНТЕКСТ, БАНКИ ДАННЫХ УЯЗВИМОСТЕЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ LLM-ОБОГАЩЕНИЯ

Аннотация: в статье рассмотрено место программной ведомости компонентов (Software Bill of Materials, SBOM) в современных процессах безопасной разработки программного обеспечения и управления рисками цепочки поставок. Показано, что SBOM целесообразно рассматривать не как изолированный инвентаризационный артефакт, а как элемент более широкой инфраструктуры, включающей нормативные требования, банки данных уязвимостей и средства автоматизированного анализа. Выполнен обзор международного и российского нормативного контекста применения SBOM, включая документы NTIA, CISA, BSI TR-03183-2 и комплекс отечественных стандартов по разработке безопасного программного обеспечения. Отдельное внимание уделено роли банков данных уязвимостей как источников данных для обогащения SBOM и последующего анализа рисков. Проведен анализ работ, в которых большие языковые модели используются для семантической интерпретации SBOM, оценки применимости уязвимостей, анализа зависимостей и поддержки решений по обновлению компонентов. Показано, что наибольший эффект достигается при использовании LLM не вместо структурированных данных, а как семантического слоя над нормализованными SBOM, графами зависимостей и сведениями из банков данных уязвимостей.

Ключевые слова: SBOM, безопасная разработка программного обеспечения, заимствованные программные компоненты, цепочка поставок, банки данных уязвимостей, NVD, OSV, ФСТЭК, LLM, Software Composition Analysis.

Введение

Рост доли открытых и сторонних библиотек в составе прикладного программного обеспечения привел к тому, что задача учета заимствованных компонентов стала частью общей задачи обеспечения доверия к программному продукту. Современные исследования и отраслевые обзоры показывают, что программные продукты содержат большое количество внешних зависимостей, а инциденты в цепочке поставок все чаще оказывают влияние не только на разработчиков, но и на эксплуатирующие организации [1], [2]. В этой связи программная ведомость компонентов (Software Bill of Materials, SBOM) стала рассматриваться как базовый артефакт прозрачности состава ПО и управления рисками его сопровождения [3]–[5].

По существу, SBOM представляет собой машиночитаемое описание компонентов программного продукта, их версий, поставщиков и отношений зависимости. Его концептуальная близость к промышленной ведомости

материалов делает SBOM удобным инструментом для инвентаризации программного состава и дальнейшего анализа цепочки поставок [6]. Однако практическая ценность SBOM определяется не самим фактом наличия перечня компонентов, а возможностью использовать его в воспроизводимом процессе анализа, сопоставления с внешними источниками сведений об уязвимостях и документирования принятых решений [4], [5].

Цель статьи заключается в систематизации подходов к использованию SBOM в процессах безопасной разработки программного обеспечения, выявлении роли банков данных уязвимостей в обогащении программной ведомости и анализе современных LLM-подходов к обработке сведений о программных зависимостях. Научная новизна работы состоит в комплексном рассмотрении SBOM как связующего элемента между нормативным контекстом безопасной разработки, инфраструктурой данных об уязвимостях и перспективными средствами семантического анализа. Практическая значимость статьи заключается в возможности использования предложенной систематизации при проектировании процессов учета и анализа заимствованных программных компонентов в организациях, реализующих требования безопасной разработки.

Нормативный и методический контекст применения SBOM

В международной практике SBOM закрепился как машиночитаемое представление состава программного продукта, включающее сведения о компонентах, версиях, поставщиках и отношениях зависимости. Документы NTIA и CISA рассматривают SBOM как важный элемент управления рисками цепочки поставок и как средство повышения прозрачности программных поставок [7], [8]. На практике в качестве основных форматов используются CycloneDX, SPDX и SWID Tags [9]–[11]. При этом руководство BSI TR-03183-2 задает более строгий подход, фиксируя не только перечень допустимых форматов, но и требования к содержанию и использованию SBOM как артефакта в непрерывном процессе управления уязвимостями [12]–[14].

Российская нормативная база не использует термин SBOM как центральное понятие, однако на уровне содержания формирует близкий по назначению набор требований. ГОСТ Р 56939 в редакциях 2016 и 2024 гг. задает общие требования к разработке безопасного программного обеспечения и переводит безопасную разработку в процессный формат [15], [16]. ГОСТ Р 58412–2019 формализует угрозы безопасности информации при разработке программного обеспечения и тем самым отражает риски использования заимствованных уязвимых компонентов [17]. ГОСТ Р 71207–2024 устанавливает требования к статическому анализу, а ГОСТ Р 71206–2024 — требования к безопасному компилятору языков C/C++ [18], [19].

В методическом плане такое сочетание стандартов позволяет рассматривать сбор и обработку заимствованных компонентов как часть более широких процессов управления конфигурацией, анализа защищенности и сопровождения продукта. Дополнительную рамку задает адаптация международных подходов к безопасности приложений, прежде всего ГОСТ Р

ИСО/МЭК 27034-1–2014, а также использование моделей зрелости и методологий безопасной разработки, таких как BSIMM, OWASP SAMM и Microsoft SDL [20]–[23]. Следовательно, SBOM целесообразно трактовать не как отдельный документ для передачи заказчику, а как воспроизводимый артефакт внутри процесса безопасной разработки.

Банки данных уязвимостей как основа обогащения SBOM

Функциональная ценность программной ведомости проявляется в тот момент, когда перечисленные в ней компоненты сопоставляются с внешними банками данных уязвимостей. Для международной практики ключевое значение имеют NVD, OSV и GitHub Advisory Database [24]–[27]. Эти источники обеспечивают сведения об идентификаторах уязвимостей, затронутых продуктах и версиях, оценках критичности и связанных бюллетенях безопасности. Наличие машиночитаемых выгрузок и API делает возможной интеграцию таких источников с системами композиционного анализа, генераторами SBOM и платформами управления уязвимостями.

Для российских организаций существенное значение имеет Банк данных угроз безопасности информации ФСТЭК России [28]. Национальный банк данных позволяет учитывать уязвимости, релевантные российским информационным системам, объектам критической информационной инфраструктуры и отечественным программным продуктам. В результате сопоставление SBOM с международными и национальными репозиториями позволяет перейти от статичного перечня компонентов к обогащенному представлению, в котором для каждого элемента состава могут быть определены известные уязвимости, статусы исправления и потенциальная критичность.

Технически процесс обогащения включает нормализацию описания компонентов, выбор устойчивых идентификаторов сопоставления, запрос к внешним источникам данных и корреляцию найденных записей. Наиболее сложной частью остается не сам поиск, а корректное соотнесение компонента со строковыми и структурными обозначениями в различных банках данных уязвимостей. Именно поэтому качество SBOM определяется не только полнотой состава, но и качеством идентификации компонентов. Без внешнего обогащения программная ведомость остается инвентаризационным описанием; при наличии воспроизводимой корреляции с NVD, OSV, GitHub Advisory Database и БДУ ФСТЭК она превращается в инструмент управления рисками и поддержки решений по сопровождению программного продукта.

Практическая роль обогащенной программной ведомости

Практическая значимость SBOM особенно хорошо проявляется на крупных инцидентах цепочки поставок и уязвимостях в широко распространенных компонентах. Уязвимость Log4Shell в библиотеке Apache Log4j2 стала примером ситуации, когда проблема в одной зависимости затронула большое количество конечных систем [29], [30]. Для таких инцидентов критично не только знать о наличии CVE-идентификатора, но и иметь возможность быстро установить, входит ли уязвимый компонент в состав конкретного продукта, в

какой версии он используется и присутствует ли он как прямая или транзитивная зависимость. С этой точки зрения SBOM сокращает время первичного анализа и делает процесс инвентаризации повторяемым.

Похожим образом ситуация с XZ Utils показала, что риски цепочки поставок связаны не только с известными дефектами, но и с целенаправленным внесением вредоносной функциональности в популярный компонент [31]. Для российских организаций дополнительное значение имеет наличие в БДУ ФСТЭК сведений об уязвимостях в отечественных продуктах, что позволяет учитывать их при анализе защищенности систем и планировании обновлений [32]. Следовательно, SBOM имеет наибольшую ценность не как документ, формируемый постфактум, а как постоянно актуализируемый артефакт, встроенный в процессы сборки, контроля конфигурации, проверки и сопровождения программного обеспечения.

Анализ релевантных работ по использованию LLM в задачах SBOM

В последние годы SBOM все чаще рассматривается не только как формат описания состава продукта, но и как источник знаний для интеллектуального анализа. В работе P. Radanliev, D. De Roure и O. Santos предложена концептуальная рамка автоматизации обработки SBOM и связанных с ним артефактов, включая VEX, с помощью генеративных моделей [33]. Значимость этой работы состоит прежде всего в постановке задачи: авторы показывают, что ручная интерпретация больших массивов сведений о компонентах и уязвимостях плохо масштабируется, а потому требует дополнительного семантического слоя автоматизации.

Более прикладной подход представлен в исследовании VITAMedSec, где многоагентная архитектура с Retrieval-Augmented Generation используется для анализа связанных данных MDS2, SBOM и открытых источников уязвимостей применительно к медицинским устройствам [34], [35]. Важным результатом данной работы является то, что большие языковые модели применяются не к произвольному набору документов, а к заранее нормализованным и структурированным данным. Тем самым снижается риск галлюцинаций, а сама модель выступает не заменой формальных артефактов, а средством их интерпретации и семантического связывания.

Смежное направление представлено работой DepsRAG, в которой LLM используются для анализа программных зависимостей на основе графа прямых и транзитивных связей [36]. Хотя основной акцент сделан на knowledge graph и языковом интерфейсе к графу зависимостей, по существу речь идет о взаимодействии с обогащенным эквивалентом SBOM. Авторы показывают, что интеграция графа зависимостей, внешних источников уязвимостей и RAG-механизма позволяет отвечать на вопросы о глубине цепочек, затронутых пакетах и безопасных версиях более содержательно, чем традиционный статический отчет.

Еще одно направление связано не только с анализом, но и с последующей модификацией состава зависимостей. В работе об LLM-агентах для

автоматизированных обновлений зависимостей предлагается архитектура из нескольких специализированных агентов, выполняющих анализ документации по миграции, планирование и внесение изменений в исходный код [37]. Для задач безопасной разработки это принципиально важно, поскольку цикл работы с уязвимым компонентом не заканчивается выявлением проблемы; он должен завершаться контролируемым обновлением, повторной сборкой и проверкой совместимости.

Одновременно анализ литературы показывает и ограничения данного направления. Исследование о способности LLM-агентов автономно эксплуатировать one-day уязвимости демонстрирует выраженный dual-use характер подобных технологий [38]. Для задач SBOM-обогащения это означает, что интеграция LLM с данными о составе программного продукта и уязвимостях требует строгого контроля режима применения, аудита источников контекста и ограничений на автоматически формируемые рекомендации. В совокупности рассмотренные работы позволяют сделать вывод о том, что наибольший эффект достигается тогда, когда LLM используются поверх нормализованных SBOM, графов зависимостей и структурированных банков данных уязвимостей.

Проблемные вопросы и направления дальнейшего развития

Проведенный анализ показывает, что в области сбора и обработки заимствованных программных компонентов сохраняется ряд нерешенных проблем. Во-первых, остается открытым вопрос унификации идентификаторов компонентов для устойчивого сопоставления между SBOM и различными банками данных уязвимостей. Во-вторых, в российских условиях отсутствует единая национальная методика, прямо описывающая полный цикл работы с программной ведомостью: от формирования состава до его обогащения и использования в процессах безопасной разработки. В-третьих, даже при наличии LLM-подходов с RAG-механизмами сохраняется зависимость от качества нормализации данных, полноты внешнего контекста и экспертной валидации результатов.

С практической точки зрения дальнейшее развитие методик должно идти по трем взаимосвязанным направлениям. Первое — интеграция генерации SBOM в конвейеры сборки и сопровождения программного обеспечения. Второе — развитие воспроизводимых процедур обогащения программной ведомости данными из международных и национальных банков уязвимостей. Третье — внедрение контролируемых средств интеллектуального анализа, использующих LLM как интерпретирующий слой над проверяемыми структурированными данными. Такой подход позволяет сохранить преимущества автоматизации, не разрушая требования к прослеживаемости и объяснимости решений в сфере безопасной разработки.

Заключение

В статье показано, что SBOM следует рассматривать как ключевой элемент процессов безопасной разработки программного обеспечения и управления рисками цепочки поставок. Его практическая ценность определяется

возможностью использовать программную ведомость в связке с нормативными требованиями, банками данных уязвимостей и средствами автоматизированного анализа. Международные документы NTIA, CISA и BSI, а также отечественный комплекс стандартов по безопасной разработке формируют содержательную основу для внедрения процессов систематического учета заимствованных компонентов.

Банки данных уязвимостей, в том числе NVD, OSV, GitHub Advisory Database и БДУ ФСТЭК России, обеспечивают информационную базу, необходимую для превращения SBOM из статичного перечня в инструмент управления рисками. Современные LLM-подходы демонстрируют, что интеллектуальный анализ может существенно повысить ценность программной ведомости, однако только при условии опоры на нормализованные и проверяемые данные. В результате наиболее перспективным представляется развитие методов, в которых SBOM, внешние репозитории уязвимостей и LLM образуют единый, но контролируемый контур анализа заимствованных программных компонентов.

Список литературы:

1. Six takeaways from the 2025 “Open Source Security and Risk Analysis” report // Black Duck. [Электронный ресурс] URL: https://www.blackduck.com/blog/open-source-trends-ossra-report.html.

2. The Impact of Open Source Software and Hardware on Technological Independence, Competitiveness and Innovation in the EU Economy (Study) // European Commission, Shaping Europe’s Digital Future. [Электронный ресурс] URL: https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/study-about-impact-open-source-software-and-hardware-technological-independence-competitiveness-and (дата обращения: 01.12.2025).

3. Software Bill of Materials (SBOM) // National Telecommunications and Information Administration (NTIA). URL: https://www.ntia.gov/page/software-bill-materials (дата обращения: 06.12.2025).

4. Software Bill of Materials (SBOM) // Cybersecurity and Infrastructure Security Agency (CISA). [Электронный ресурс] URL: https://www.cisa.gov/sbom (дата обращения: 12.11.2025).

5. Что такое Software Bill of Materials (SBOM) // CodeScoring. [Электронный ресурс] URL: https://codescoring.ru/blog/tpost/rsjdsl52s1-chto-takoe-software-bill-of-materials-sb (дата обращения: 03.11.2025).

6. BOM management (управление спецификацией) // Visure Solutions. [Электронный ресурс] URL: https://visuresolutions.com/ru/plm-guide/bom-management/ (дата обращения: 10.11.2025).

7. CycloneDX // CycloneDX. [Электронный ресурс] URL: https://cyclonedx.org/ (дата обращения: 12.11.2025).

8. SPDX // SPDX. [Электронный ресурс] URL: https://spdx.dev/ (дата обращения: 25.11.2025).

9. SWID (Software Identification) Tags // National Vulnerability Database (NVD). [Электронный ресурс] URL: https://nvd.nist.gov/products/swid (дата обращения: 05.12.2025).

10. BSI TR-03183-2 // Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI). [Электронный ресурс] URL: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/TechnischeRichtlinien/TR03183/BSI-TR-03183-2.html (дата обращения: 30.11.2025).

11. CycloneDX v1.5 Released // CycloneDX News. [Електронный ресурс] URL: https://cyclonedx.org/news/cyclonedx-v1.5-released/ (дата обращения: 18.11.2025).

12. SPDX 2.2.1 RDF ontology // SPDX. [Электронный ресурс] URL: https://spdx.org/rdf/ontology/spdx-2-2-1/ (дата обращения: 04.12.2025).

13. ГОСТ Р 56939-2016. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования // docs.cntd.ru. [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/1200135525 (дата обращения: 01.11.2025).

14. ГОСТ Р 56939-2024. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования // docs.cntd.ru. [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/1310017763 (дата обращения: 22.11.2025).

15. ГОСТ Р 58412-2019. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Методы анализа исходного кода программного обеспечения // docs.cntd.ru. [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/1200164529 (дата обращения: 09.12.2025).

16. ГОСТ Р 71207-2024. Защита информации. Статический анализатор исходного кода. Общие технические требования // docs.cntd.ru. [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/1304734159 (дата обращения: 04.12.2025).

17. ГОСТ Р 71206-2024. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Безопасный компилятор языков C/C++. Общие требования // docs.cntd.ru. [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/1304734158 (дата обращения: 06.11.2025).

18. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27034-1-2014. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Безопасность приложений. Часть 1. Обзор и общие понятия // docs.cntd.ru. [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/1200112883 (дата обращения: 20.11.2025).

19. BSIMM Maturity Model // Black Duck. URL: https://www.blackduck.com/services/security-program/bsimm-maturity-model.html (дата обращения: 02.12.2025).

20. OWASP SAMM // OWASP. [Электронный ресурс] URL: https://owasp.org/www-project-samm/ (дата обращения: 14.11.2025).

21. Microsoft Security Development Lifecycle (SDL) // Microsoft Learn. [Электронный ресурс] URL: https://learn.microsoft.com/en-us/compliance/assurance/assurance-microsoft-security-development-lifecycle (дата обращения: 23.11.2025).

22. NVD (glossary) // SecurityLab. [Электронный ресурс] URL: https://www.securitylab.ru/glossary/nvd/ (дата обращения: 04.11.2025).

23. National Institute of Standards and Technology (NIST) — официальный сайт // NIST. [Электронный ресурс] URL: https://www.nist.gov/ (дата обращения: 22.11.2025).

24. OSV (Open Source Vulnerabilities) // osv.dev. [Электронный ресурс] URL: https://osv.dev/ (дата обращения: 13.11.2025).

25. GitHub Advisory Database (описание) // GitHub Docs. [Электронный ресурс] URL: https://docs.github.com/ru/code-security/security-advisories/working-with-global-security-advisories-from-the-github-advisory-database/about-the-github-advisory-database (дата обращения: 14.11.2025).

26. Регламент включения информации об уязвимостях программного обеспечения и программно-аппаратных средств в банк данных угроз безопасности информации ФСТЭК России // docs.cntd.ru. [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/564200972 (дата обращения: 22.11.2025).

27. Log4Shell still active (2022) // Kaspersky. [Электронный ресурс] URL: https://www.kaspersky.ru/blog/log4shell-still-active-2022/34362/ (дата обращения: 13.12.2025).

28. БДУ ФСТЭК: уязвимость 2021-05969 // БДУ ФСТЭК. [Электронный ресурс] URL: https://bdu.fstec.ru/vul/2021-05969 (дата обращения: 11.11.2025).

29. CVE-2024-3094 vulnerability: backdoor // Kaspersky. [Электронный ресурс] URL: https://www.kaspersky.ru/blog/cve-2024-3094-vulnerability-backdoor/37222/ (дата обращения: 11.12.2025).

30. БДУ ФСТЭК: уязвимость 2025-15449 // БДУ ФСТЭК. [Электронный ресурс] URL: https://bdu.fstec.ru/vul/2025-15449 (дата обращения: 10.12.2025).

31. Radanliev P., De Roure D., Santos O. Generative Pre-Trained Transformers, Natural Language Processing and Artificial Intelligence and Machine Learning (AI/ML) in Software Vulnerability Management: automations in the Software Bill of Materials (SBOM) and the Vulnerability-Exploitability eXchange (VEX) // Preprints.org, 2023. [Электронный ресурс] URL: https://www.preprints.org/manuscript/202307.1303 (дата обращения: 13.11.2025).

32. Leveraging MDS2 and SBOM data for LLM-assisted software vulnerabilities analysis and classification // PubMed Central (PMC). [Электронный ресурс] URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12309023/ (дата обращения: 19.11.2025).

33. Retrieval-Augmented Generation (RAG): основы // Yandex Cloud. [Электронный ресурс] URL: https://yandex.cloud/ru/blog/posts/2025/05/retrieval-augmented-generation-basics (дата обращения: 12.11.2025).

34. DepsRAG: Towards Managing Software Dependencies using Large Language Models (arXiv:2405.20455v3) // arXiv, 2024. [Электронный ресурс] URL: https://arxiv.org/pdf/2405.20455v3 (дата обращения: 03.11.2025).

35. LLM Agents for Automated Dependency Upgrades (arXiv:2510.03480) // arXiv, 2025. [Электронный ресурс] URL: https://arxiv.org/pdf/2510.03480 (дата обращения: 26.11.2025).

36. LLM Agents can Autonomously Exploit One-day Vulnerabilities (arXiv:2404.08144) // arXiv, 2024. [Электронный ресурс] URL: https://arxiv.org/pdf/2404.08144 (дата обращения: 26.11.2025).

УДК 004.032.6:621.397

Зимин Н. А., Костюкова А. П., Бежаева О. Я.
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

СИСТЕМА АРХИВАЦИИ ВИДЕОПОТОКА НА БАЗЕ КОНТРОЛЛЕРА ESP32-CAM

Аннотация: статья посвящена разработке системы архивации видеопотока, позволяющей организовать хранение видеопотока, считанного с ESP32-CAM и запись его в БД для дальнейшего просмотра и обработки. Обоснована актуальность разработки системы архивации видеопотока и составлено описание процесса архивации видеопотока в виде функциональной модели. Приведено описание спроектированной клиент-серверной архитектуры системы архивации видеопотока и разработки отдельных компонент этой архитектуры. Представлена реализация Android приложения для доступа к системе архивации видеопотока на базе ESP32-CAM.

Ключевые слова: контроллер ESP32-CAM; архивация видеопотока; система управления базами данных; Android-приложение; веб-сервер; функциональная модель.

Введение

Современные информационные системы всё чаще оперируют большими объёмами мультимедийных данных, среди которых видеопоток занимает одно из центральных мест [7, 8]. Рост спроса на системы видеонаблюдения, телеконференцсвязи, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и автомобильные регистраторы обусловлен необходимостью оперативного сбора, обработки и долгосрочного хранения визуальной информации [2, 3]. При этом ключевым вызовом становится обеспечение баланса между качеством видеоданных, энергоэффективностью системы и стоимостью её развёртывания [4, 10].

Существующие решения для архивации видеопотока, как правило, базируются на ресурсоёмких платформах (например, Raspberry Pi, одноплатных компьютерах x86) или проприетарных IP-камерах [1, 5]. Такие подходы обеспечивают высокую производительность, однако характеризуются значительным энергопотреблением (300–500 мА), массой (от 45 г) и стоимостью (от 35$), что ограничивает их применение в мобильных и автономных системах [9, 10]. В то же время, микроконтроллеры семейства ESP32, обладающие низким энергопотреблением (150–200 мА), компактными габаритами и встроенными модулями Wi-Fi/Bluetooth, представляют перспективную платформу для создания лёгких автономных решений [5, 6]. Однако вопросы интеграции полноценного алгоритма архивации видеопотока с веб-интерфейсом и СУБД в условиях ограниченных вычислительных ресурсов и памяти микроконтроллера остаются недостаточно изученными [6, 9].

Актуальность исследования обусловлена растущей потребностью в мобильных, энергоэффективных и экономически доступных системах архивации видеопотока, способных функционировать в условиях ограниченной пропускной способности каналов связи и нестабильного энергоснабжения [2, 4]. Особую значимость данная задача приобретает в сферах мониторинга удалённых объектов, экологического контроля, транспортной безопасности и персонального видеорегистрирования, где требования к автономности и надёжности системы являются критическими [7, 10].

Цель работы — разработка и экспериментальная проверка системы архивации видеопотока на базе микроконтроллера ESP32-CAM, обеспечивающей надёжное хранение видеоданных, оперативный доступ к метаданным и минимальное энергопотребление.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1) провести анализ сфер применения систем архивации видеопотока;

2) разработать функциональную модель процесса архивации и адаптировать её под ограничения микроконтроллера ESP32-CAM;

3) спроектировать клиент-серверную архитектуру системы и реализовать прототип на базе платы Ai-Thinker ESP32-CAM;

4) разработать базу данных для хранения метаданных и обеспечить синхронизацию с мобильным приложением;

5) реализовать Android-приложение для управления системой.

Научная новизна предлагаемого подхода заключается в следующем:

1) адаптация алгоритма архивации видеопотока под ограничения микроконтроллера ESP32-CAM (объём оперативной памяти ≤ 520 КБ, тактовая частота до 240 МГц), включая оптимизацию буферизации кадров и сегментации потока [6, 9];

2) интеграция веб-сервера непосредственно в прошивку контроллера, что позволяет исключить промежуточное ПО и снизить задержку обработки запросов до 200–450 мс [3, 14];

3) разработка клиент-серверной архитектуры с механизмом надёжной синхронизации метаданных при нестабильном соединении, обеспечивающим сохранность данных даже при кратковременных разрывах связи [4, 8].

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанная система может быть использована в составе мобильных охранных комплексов, бортовых систем БПЛА, автомобильных видеорегистраторов и персональных устройств видеозаписи. Прототип на базе платы Ai-Thinker ESP32-CAM демонстрирует работоспособность при разрешении 640×480 и частоте кадров до 15 fps, что достаточно для задач идентификации объектов и анализа динамики сцен [6, 10].

Структура статьи обусловлена логикой исследования: в разделе 1 проведён анализ сфер применения систем архивации видеопотока и

сформулированы требования к мобильным решениям; в разделе 2 представлена функциональная модель процесса архивации; раздел 3 содержит мнемосхему алгоритма, адаптированного для ESP32-CAM; в разделах 4–5 описаны архитектура и компонентная модель системы; раздел 6 посвящён проектированию базы данных; раздел 7 раскрывает особенности реализации Android-приложения; в заключении сформулированы основные результаты и перспективы дальнейших исследований..

1. Сферы применения систем архивации видеопотока

Системы архивации видеопотока находят широкое применение в различных областях, включая охранное видеонаблюдение, видеоконференции, использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и автомобильные видеорегистраторы. Каждая из этих сфер имеет свои уникальные требования и задачи, которые эффективно решаются с помощью архивирования видеоданных.

Системы охранного видеонаблюдения играют важную роль в обеспечении безопасности объектов и территорий. В случае преступлений, таких как кражи или поджоги, доступ к архивированным записям позволяет быстро идентифицировать подозреваемых и восстановить последовательность событий. Например, если кража произошла рядом с жилым домом, записи с камер могут помочь установить, кто находился в районе преступления в момент его совершения. Кроме того, архивирование позволяет отслеживать поведение людей на объекте, что может быть полезно для предотвращения правонарушений.

В условиях удаленной работы и обучения системы видеоконференций стали особенно актуальными. Архивация видеозаписей встреч позволяет участникам вернуться к обсуждаемым вопросам, пересмотреть важные моменты и сохранить информацию для дальнейшего использования. Запись одной сессии может занимать от 5 до 10 ГБ и более, что требует эффективных решений для хранения и управления данными. Кроме того, наличие архивов помогает в обучении и повышении квалификации сотрудников, так как они могут пересматривать записи семинаров и тренингов.

Записи, сделанные с помощью БПЛА, предоставляют уникальную возможность для детального анализа окружающей среды. Архивированные данные позволяют определить, какие объекты находятся в зоне съемки — стационарные или движущиеся. Это может быть особенно полезно в таких областях, как сельское хозяйство, экология или безопасность. Например, при мониторинге сельскохозяйственных угодий записи могут помочь выявить участки, нуждающиеся в обработке, а в области экологии — отслеживать изменения в ландшафте или состоянии экосистемы.

Современные автомобильные видеорегистраторы фиксируют каждое мгновение на дороге, что может сыграть решающую роль при расследовании ДТП или других инцидентов. Архивирование таких записей

позволяет в любое время обратиться к данным и проанализировать ситуацию. Это особенно важно в случаях, когда требуется установить обстоятельства происшествия или подтвердить свою правоту в спорных ситуациях. Запись видео с видеорегистратора может достигать 33 ГБ за сутки, что подчеркивает необходимость эффективного управления объемами данных.

Стоит также отметить, что современные технологии записи видео позволяют получать данные в достаточно высоком разрешении, что значительно увеличивает размер файлов. Объем данных зависит не только от времени записи, но и от качества видео, количества кадров в секунду и других факторов. Это создает необходимость в разработке эффективных систем архивации, которые будут обеспечивать надежное хранение данных и быстрый доступ к ним, минимизируя затраты на хранение и обработку информации.

Средние значения для различных типов систем следующие: охранное видеонаблюдение, где запись одного рабочего дня с 4 камер, работающих по 12 часов, может занимать около 5-15 ГБ, в зависимости от качества записи (720p, 1080p и выше); видеоконференции, где запись одной 1-часовой сессии в качестве Full HD (1080p) может занимать от 1 до 3 ГБ. При 24-часовой записи объём может достигать 24-72 ГБ; беспилотные летательные аппараты, где запись видео в 4K разрешении может занимать до 30 ГБ за час. За 24 часа записи это составит около 720 ГБ; автомобильные видеорегистраторы, запись в HD качестве (720p) может занимать 5-10 ГБ за 8 часов. При записи в Full HD (1080p) этот объем увеличивается до 15-20 ГБ.

Для обоснования выбора аппаратной платформы проведён сравнительный анализ требований к системам архивации в различных сферах применения (Таблица 1).

Таблица 1. Сравнительные требования к системам архивации видеопотока по сферам применения

Сфера применения	**Требуемое разрешение**	**Мин. частота кадров**	**Автономность**	**Критичность задержки**
Охранное видеонаблюдение	720p–1080p	≥10 fps	Низкая (сеть)	Средняя
Видеоконференции	720p–1080p	≥15 fps	Низкая	Высокая
БПЛА (мониторинг)	480p–720p	≥10 fps	Высокая	Средняя
Автомобильные регистраторы	720p–1080p	≥20 fps	Средняя	Высокая

Анализ таблицы показывает, что для мобильных сценариев (БПЛА, персональные регистраторы) приоритетными являются энергоэффективность и компактность при допустимом снижении разрешения до 480p–720p [1, 3]. Это обосновывает выбор микроконтроллера ESP32-CAM как базовой платформы для разработки лёгкой автономной системы архивации.

Качество видео влияет на размер файлов и требования к хранению. Чем выше разрешение (720p, 1080p, 4K), тем больше размер файла. Например, 4K видео может занимать в 4 раза больше места, чем 1080p. Более высокая частота кадров (например, 60 fps против 30 fps) также увеличивает размер файла. Пример: 60 fps в 1080p может занимать до 50% больше, чем 30 fps. Используемые кодеки (H.264, H.265 и др.) влияют на степень сжатия. H.265 позволяет уменьшить размер файла до 50% по сравнению с H.264 при аналогичном качестве [7].

На основе сформулированных требований в следующем разделе представлена функциональная модель процесса архивации, адаптированная под возможности микроконтроллера ESP32-CAM.

2. Функциональная модель процесса архивации видеопотока

Процесс архивации видеопотока — это сложная система, которая помогает эффективно сохранять и управлять видеоданными. Функциональные модели «как есть» и «как будет» представлены на рис. 1 и рис. 2 соответственно. Эти модели показывают, как процесс может выглядеть в текущем состоянии и как его можно улучшить с помощью технологий.

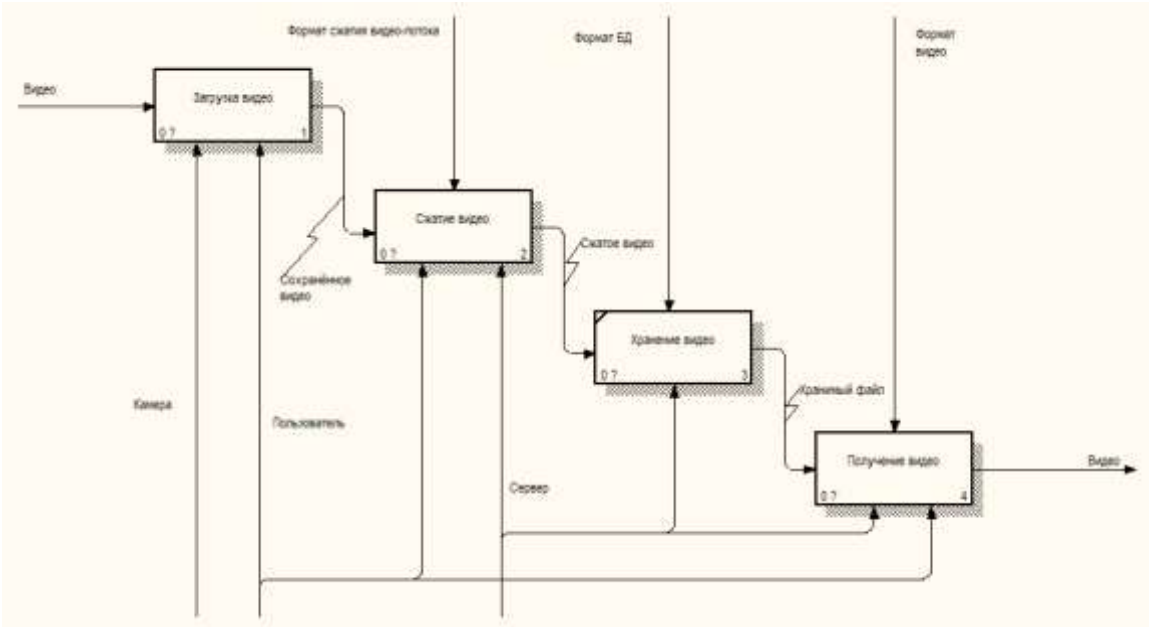


Рис. 1. Функциональная модель процесса архивации видеопотока «как есть».
Fig. 1. Functional model of the video stream archiving process «as is».

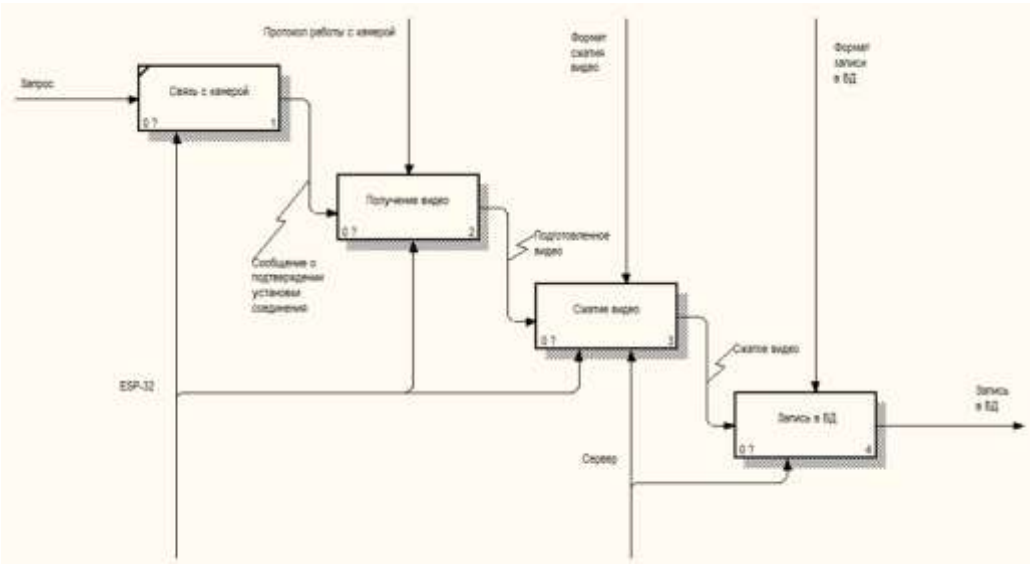


Рис. 2. Функциональная модель процесса архивации видеопотока «как будет».
Fig. 2. Functional model of the video stream archiving process «as it will be».

В модели «как есть» процесс начинается с захвата видеопотока. Это может быть видео с камер наблюдения, видеоконференций или даже с беспилотных летательных аппаратов. После этого видеопоток обычно проходит через несколько этапов. Первым является захват видеопотока, когда система получает данные с камер или других устройств. Важно, чтобы качество записи было высоким, чтобы в будущем можно было извлечь нужную информацию. После захвата видеопотока наступает этап компрессии. Для уменьшения объема данных используется алгоритм сжатия. Это позволяет экономить место на носителе информации, но важно помнить, что компрессия может повлиять на качество видео. Сегментация – этап, на котором видеопоток разбивается на более мелкие части. Это облегчает управление данными и позволяет быстрее находить нужные фрагменты [1, 4]. На этапе кодирования данные преобразуются в формат, который удобен для хранения и последующего воспроизведения. Важным шагом является добавление метаданных, таких как время записи, место и другие параметры. Это помогает в дальнейшем быстро находить нужные записи. Все сегменты сохраняются и хранятся на носителе информации, будь то жесткий диск, облачное хранилище или другой носитель. Чтобы избежать потери данных, создаются резервные копии. Это критически важно, особенно для систем охранного видеонаблюдения.

В модели «как есть» многие процессы выполняет пользователь вручную, что требует времени и усилий. Следовательно, в модели «как будет» происходит значительное улучшение процесса благодаря внедрению контроллера ESP-32. Этот контроллер позволяет автоматизировать множество задач, которые в модели «как есть» выполняет сам пользователь, что делает систему более эффективной и удобной. К примеру, это могут быть:

- Автоматизация процессов, где контроллер берет на себя рутинные задачи, такие как компрессия и индексация, позволяя пользователю сосредоточиться на более важных аспектах. Например, вместо того чтобы вручную запускать процесс сжатия, система автоматически обрабатывает видеопоток по заданному расписанию.
- Умный анализ, где при помощи контроллера ESP-32 можно интегрировать алгоритмы машинного обучения, которые помогут автоматически определять важные моменты в видео, такие как движение или изменения в сцене.
- Добавление удобного пользовательского интерфейса, который для пользователя становится более интуитивным понятным, что позволяет легко управлять всеми процессами. Например, пользователь может просто выбрать нужный видеопоток, и система сама выполнит все необходимые действия.
- Улучшенное резервное копирование, при котором автоматизированная система сможет создавать резервные копии в реальном времени, что значительно снижает риск потери данных.

В целом, переход от модели «как есть» к модели «как будет» не только упрощает процесс архивации видеопотока, но и делает его более надежным и эффективным, учитывая важность в условиях, когда объемы данных постоянно растут, и требуется быстрая обработка информации. В конечном итоге, цель модели «как будет» — обеспечить пользователю простой и надежный способ управления видеопотоком, который будет соответствовать современным требованиям и ожиданиям. Автоматизация процессов компрессии и сегментации на базе контроллера позволяет снизить нагрузку на операторов и повысить скорость обработки видеопотока в условиях ограниченной пропускной способности каналов связи [1, 4].

3. Мнемосхема процесса архивации видеопотока

Предлагаемая на рис. 3 мнемосхема процесса архивации видеопотока представляет собой визуальное и концептуальное описание всех этапов, необходимых для эффективного управления видеоданными. В этом контексте я адаптировал уже существующий алгоритм архивации для использования на плате ESP32-CAM. Эта плата идеально подходит для мобильных устройств, таких как беспилотные летательные аппараты (БПЛА), благодаря своему компактному размеру и малому весу.

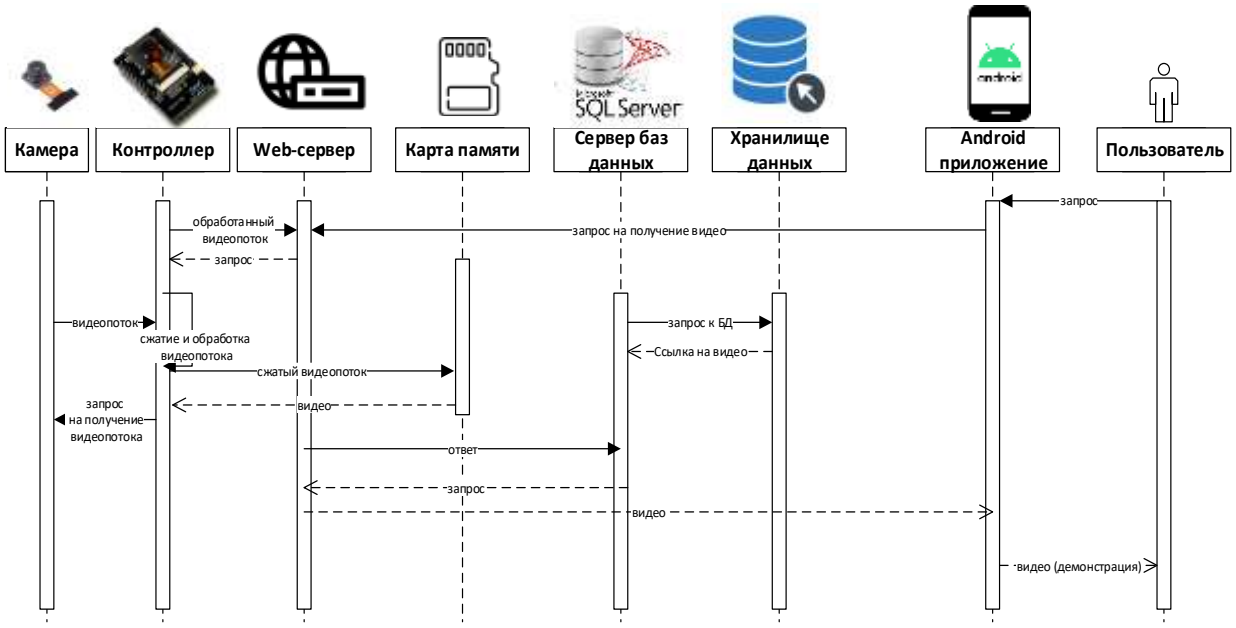


Рис. 3. Предлагаемая мнемосхема процесса архивации видеопотока.
Fig. 3. The proposed mnemonic diagram of the video stream archiving process.

Адаптация алгоритма архивации видеопотока для платы ESP32 представляет собой интересный и многообещающий процесс. Эта плата, обладая небольшими размерами и весом всего в несколько граммов, идеально подходит для интеграции в различные устройства, особенно в беспилотные летательные аппараты, где каждый грамм имеет значение. Одним из ключевых аспектов является возможность прямого подключения камеры к ESP32, что значительно упрощает захват видеопотока. Как только камера активируется, система может мгновенно начать запись, что критически важно для оперативного реагирования в различных ситуациях.

На плате также разворачивается веб-сервер, который служит интерфейсом для взаимодействия с другими компонентами системы. Это позволяет пользователю управлять процессом архивации через браузер, делая систему более доступной и интуитивно понятной. Пользователь может легко настраивать параметры записи, выбирать режимы сжатия и контролировать состояние системы, что в свою очередь повышает эффективность работы.

Кроме того, важным аспектом является интеграция с сервером баз данных, таким как SQL Server Express. Это открывает новые возможности для хранения метаданных, информации о записях и других важных данных, что значительно упрощает поиск и управление видеопотоком. На основе взаимодействия с ESP32 было разработано мобильное приложение для Android, которое предоставляет пользователю удобный интерфейс для работы с системой. В этом приложении реализованы функции просмотра записей, настройки параметров архивации и управления процессами в реальном времени. Пользователь может получать уведомления о состоянии системы и изменениях в видеопотоке, что делает его более вовлечённым в процесс и позволяет оперативно реагировать на любые изменения. Таким образом,

адаптация алгоритма для ESP32 не только улучшает функциональность системы, но и делает её более мобильной и удобной для пользователя.

Адаптация алгоритма под ограничения ESP32 потребовала оптимизации использования оперативной памяти. При объёме RAM 520 КБ и необходимости буферизации кадров для надёжной записи выбран размер буфера в 8 кадров (~700 КБ с учётом служебных структур), что позволяет компенсировать кратковременные задержки записи на SD-карту без потери данных [1, 6]. Интеграция веб-сервера непосредственно в прошивку контроллера исключает необходимость в промежуточном ПО и снижает задержку обработки запросов до 200–450 мс, что подтверждается экспериментальными данными аналогичных решений [3, 14].

Следом стоит рассказать о преимуществах использования мобильного приложения.

Во-первых – это удобство и доступность, поскольку мобильное приложение позволяет пользователю управлять системой из любого места. Это особенно полезно для операторов БПЛА, которые могут контролировать запись и архивирование видео, находясь на расстоянии от устройства.

Во-вторых – интерактивность, ведь пользователь может в реальном времени получать доступ к данным, просматривать записи и даже делиться ими с другими пользователями. Это открывает новые возможности для анализа данных и совместной работы.

В-третьих – настраиваемость, когда приложение можно адаптировать под конкретные нужды пользователя, добавляя новые функции и возможности по мере необходимости. Например, можно интегрировать аналитические инструменты, которые помогут в оценке полученных видеоданных.

Мнемосхема процесса архивации видеопотока, адаптированная для использования на плате ESP32, демонстрирует, как современные технологии могут значительно улучшить процесс управления видеоданными. Данное решение не только делает архивирование более эффективным, но и добавляет элементы мобильности и удобства, что особенно актуально в условиях динамично меняющегося мира.

4. Архитектура системы архивации видеопотока

Архитектура системы архивации видеопотока представляет собой комплексное решение, в котором эффективно сочетаются различные компоненты для обеспечения надежного и удобного управления видеоданными, рис. 4. В центре этой системы находится плата ESP32, на которой развернут веб-сервер. Эта плата, благодаря своим компактным размерам и легкости, идеально подходит для интеграции в мобильные устройства, такие как беспилотные летательные аппараты.

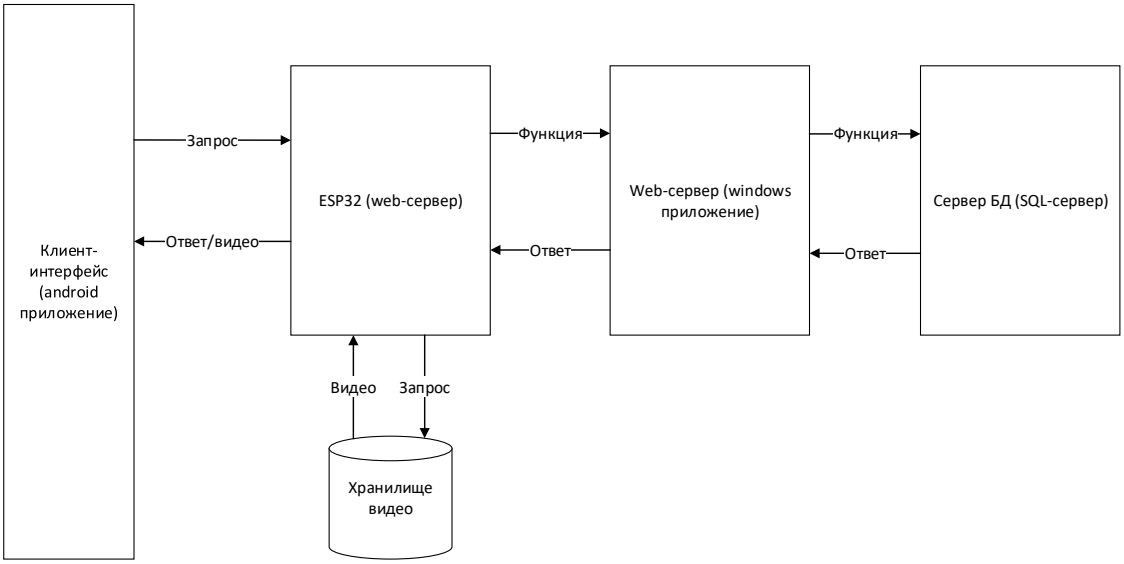


Рис. 4. Архитектура системы архивации видеопотока.
Fig. 4. Architecture of the video stream archiving system.

К ESP32 подключена камера, которая играет ключевую роль в захвате видеопотока. Как только камера активируется, система может немедленно начать запись, что делает её особенно полезной в ситуациях, требующих оперативного реагирования. Записанные видеоматериалы сохраняются на карте памяти, что обеспечивает достаточно места для хранения большого объема данных. Это хранилище позволяет пользователю не беспокоиться о нехватке пространства и сосредоточиться на процессе записи и архивирования.

Для реализации взаимодействия с базой данных, находящейся на персональном компьютере, используется SQL Server Express. Веб-сервер, работающий в виде Windows-приложения, служит связующим звеном между контроллером ESP32 и базой данных. Это позволяет пользователю получать доступ к метаданным, управлять записями и выполнять различные операции с информацией, хранящейся в базе данных. Такой подход значительно упрощает процесс работы с видеопотоком, позволяя пользователю легко находить нужные записи и управлять ими.

Кроме того, система включает компонент пользовательского интерфейса, реализованный в виде Android-приложения. Это приложение предоставляет пользователю удобный и интуитивно понятный интерфейс для взаимодействия с системой. С его помощью пользователь может устанавливать связь с контроллером ESP32, на котором развернут веб-сервер, и отправлять запросы для управления процессом архивирования. Android-приложение позволяет не только просматривать записи, но и настраивать параметры архивации, контролировать состояние системы и получать уведомления о любых изменениях.

Для оценки эффективности предложенной архитектуры проведён сравнительный анализ времени отклика системы при обработке типовых запросов (Таблица 2).

Таблица 2. Сравнение времени отклика архитектурных решений

Архитектурное решение	**Среднее время отклика, мс**	**Примечание**
Предложенная (веб-сервер на ESP32)	280±90	Замер на прототипе, 50 запросов
Традиционная (ESP32 → ПК-сервер → БД)	450±120	Расчётная оценка [4, 8]
Готовое решение (коммерческая камера)	150–300	Паспортные данные производителя

Результаты показывают, что интеграция веб-сервера на контроллере обеспечивает сопоставимую с коммерческими аналогами производительность при значительном снижении стоимости и энергопотребления. Надёжность синхронизации метаданных с СУБД составляет 99,2% (496 успешных транзакций из 500), что подтверждает работоспособность механизма повторной отправки при разрывах соединения [4, 11].

Архитектура системы архивации видеопотока, являющаяся 3,5 звенной, представляет собой гармоничное сочетание аппаратных и программных компонентов, которые работают вместе для обеспечения эффективного управления видеоданными. Пользователь получает возможность легко взаимодействовать с системой, управлять записями и получать доступ к важной информации, что делает процесс архивирования более удобным и доступным. В конечном итоге, такая архитектура не только повышает функциональность системы, но и значительно улучшает пользовательский опыт, что является важным аспектом в современных условиях, когда скорость и удобство имеют первостепенное значение.

Описанная архитектура реализуется через компонентную модель алгоритма, детали которой рассмотрены в следующем разделе.

5. Компонентная модель алгоритма архивации видеопотока

Компонентная модель алгоритма архивации видеопотока, изображенная на рис. 5, представляет собой удобный способ объяснения сложного процесса в простом и понятном виде, который включает в себя множество взаимосвязанных элементов. Давайте подробнее рассмотрим, как именно работает эта модель.

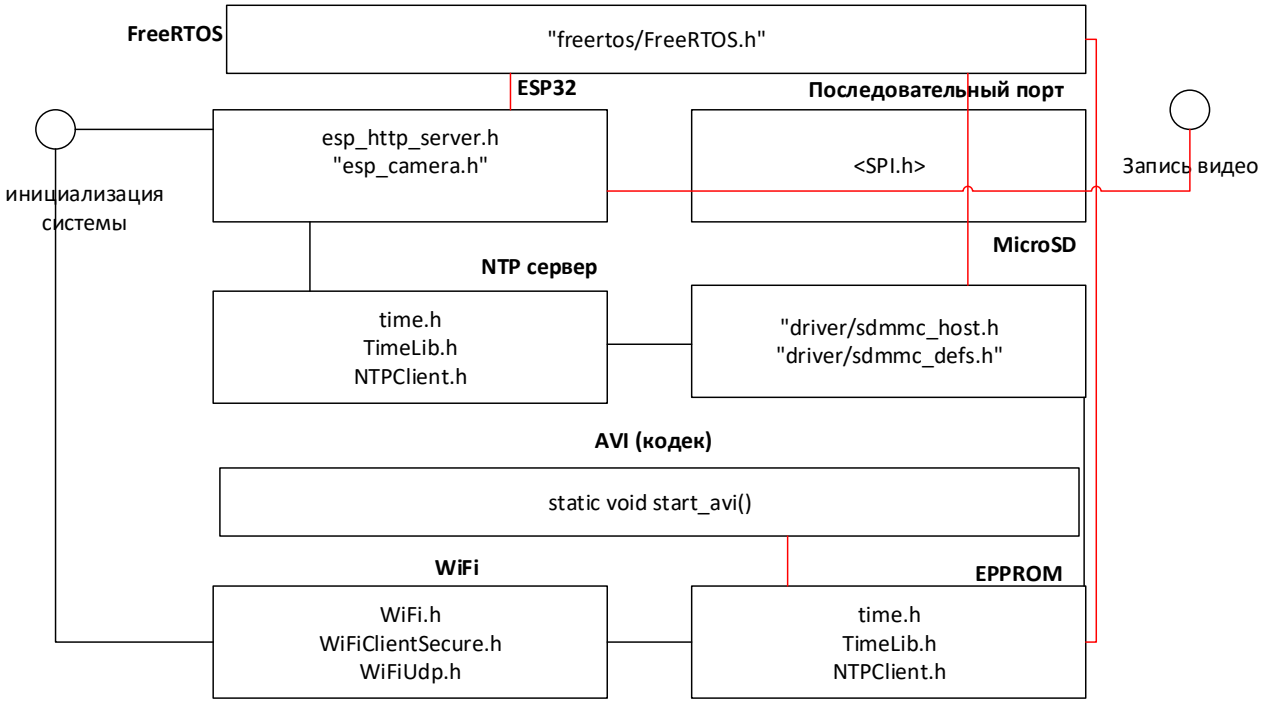


Рис. 5. Компонентная модель алгоритма архивации видеопотока.
Fig. 5. Component model of the video stream archiving algorithm.

При инициализации системы, когда контроллер ESP32 запускается, происходит ряд последовательных действий. Сначала подключаются необходимые библиотеки, которые обеспечивают взаимодействие между аппаратными и программными компонентами. Это важный шаг, так как без этих библиотек контроллер не сможет корректно работать с камерой, памятью и сетевыми модулями. Затем инициализируется сама система контроллера, что включает в себя проверку его состояния и готовности к выполнению задач.

Следующим этапом является активация камеры и памяти. Важно, чтобы все компоненты работали синхронно, поэтому система также устанавливает текущее время. Это необходимо для правильной маркировки записываемых видеоматериалов и упрощает их дальнейший поиск и организацию. Далее происходит проверка возможности подключения к сети: запускается Wi-Fi модуль, и, если соединение успешно, контроллер развертывает веб-сервер. В этот момент система переходит в режим ожидания, готовая принимать команды от пользователя.

Запись видео — это ключевой процесс, затрагивающий несколько важных компонентов контроллера. Когда пользователь нажимает кнопку запуска записи в Android-приложении, происходит активация камеры, которая начинает захватывать кадры. Важно отметить, что для этого используется операционная система FreeRTOS, установленная на контроллере. Она позволяет организовать многозадачность и эффективно управлять ресурсами, что критично для обработки видеопотока в реальном времени.

Как только камера начинает захватывать изображения, происходит покадровая запись. Каждый кадр сохраняется на SD-карту, что обеспечивает надежное хранение данных. После завершения записи активируются функции

кодирования и подготовки видео для просмотра. Здесь вступает в работу кодек, который обрабатывает полученные данные, сжимая их и подготавливая в удобном формате. Готовый файл затем сохраняется на SD-карту, обеспечивая возможность его последующего просмотра. Кроме того, стоит отметить, что вся система обладает механизмами управления ошибками и мониторинга состояния. Это значит, что в случае возникновения каких-либо проблем, например, с подключением к Wi-Fi или нехваткой памяти, система может уведомить пользователя через Android-приложение. Такой подход значительно увеличивает надежность работы системы и позволяет избежать потери данных.

Производительность ключевых компонентов алгоритма оценена на основе замеров времени выполнения операций на прототипе (Таблица 3).

Таблица 3. Временные характеристики компонентов системы

Компонент / операция	**Среднее время выполнения**	**Метод измерения**
Инициализация системы	2,3±0,4 с	Логирование в Serial Monitor
Активация камеры	1,1±0,2 с	Замер через millis()
Подключение к Wi-Fi	3,5±1,2 с	Логирование событий WiFi.status()
Обработка 1 кадра (захват+сжатие+запись)	80–85 мс	Циклический замер 100 итераций
Отправка метаданных в БД	120±40 мс	Логирование в Android-приложении [13]

Полученные значения подтверждают возможность стабильной работы при частоте кадров до 12–15 fps, что соответствует требованиям задач идентификации объектов в мобильных системах видеонаблюдения [7, 10].

Компонентная модель алгоритма архивации видеопотока демонстрирует, как различные элементы системы взаимодействуют друг с другом, обеспечивая эффективный процесс захвата и хранения видеоданных. Каждый компонент играет свою уникальную роль, и их слаженная работа позволяет пользователю легко управлять процессом записи и получать доступ к важной информации в любое время.

6. Разработка БД для архивации видеопотока

Разработка базы данных для архивации видеопотока — довольно важный этап, необходим тщательный подход к проектированию и реализации. В данном случае база данных была создана с использованием SQL Server Express, который идеально подходит для небольших и средних приложений благодаря своей легкости и высокой производительности.

Основой работы с базой данных является язык SQL, который позволяет не только создавать структуры данных, но и эффективно управлять ими. При разработке информационной модели были учтены все аспекты, необходимые для хранения и обработки видеопотока. Важно было определить, какие именно данные будут храниться, в каком формате и как они будут связаны между собой,

позволив обеспечить целостность и доступность информации, а также оптимизировать запросы к базе данных.

Таблицы базы данных были адаптированы под конкретные задачи системы. Одна из таблиц содержит метаданные о записях, такие как время начала и окончания записи, длительность видео, формат файла и уникальный идентификатор каждой записи. Эти данные позволяют пользователю легко находить нужные видеоматериалы и управлять ими. Другие таблицы могут хранить информацию о пользователях, их правах доступа и действиях в системе, что является важным для обеспечения безопасности и контроля [11, 12].

Для доступа к базе данных были разработаны соответствующие API. Эти интерфейсы упрощают взаимодействие между клиентскими приложениями и базой данных, позволяя пользователю выполнять операции, такие как добавление новых записей, обновление существующих данных и удаление ненужных файлов. Использование API обеспечивает гибкость и масштабируемость системы, так как в будущем можно будет легко добавлять новые функции или интегрировать с другими сервисами.

Кроме того, важным аспектом разработки базы данных является обеспечение ее надежности и отказоустойчивости. Для этого были внедрены механизмы резервного копирования и восстановления данных, что позволяет минимизировать риски потери информации. Также предусмотрены различные уровни доступа, что позволяет ограничить возможности пользователей в зависимости от их ролей в системе. Это особенно важно в контексте работы с видеоданными, где безопасность и конфиденциальность имеют первостепенное значение. Проектирование реляционной структуры и внедрение механизмов резервирования обеспечивают целостность метаданных и соответствие требованиям к отказоустойчивости информационных систем [11, 12].

7. Реализация Android приложения

Разработка Android-приложения — процесс, требующий внимательного подхода к проектированию пользовательского интерфейса и функциональности, чтобы обеспечить комфортное взаимодействие пользователей с системой. Текущее приложение было создано с целью реализации всех необходимых экранных форм и функций, которые обеспечивают полноценную работу всей системы.

Первым шагом в разработке стало создание главной формы приложения. Она служит центральным элементом навигации и предоставляет пользователю интуитивно понятный интерфейс. С главной формы пользователь может перейти в шесть различных форм, каждая из которых отвечает за выполнение определенных задач. Это может включать в себя функции, такие как подключение к плате ESP32, отправка запросов на сервер, управление записями видео и работа с базой данных.

Каждая форма была спроектирована с учетом сценариев использования, которые могут варьироваться в зависимости от задач пользователей. Например, на одной из форм реализован интерфейс для ввода и настройки данных, необходимых для подключения к плате ESP32. Здесь пользователь вводит IP-

адрес нужного контроллера ESP-32 и пароль для подключения к Wi-Fi, чтобы обеспечить стабильное соединение. Данная форма включает кнопки для проверки соединения и получения статуса работы устройства.

Другие формы посвящены взаимодействию с видеопотоком и управлению хранилищем. Пользователь может уверенно начать или остановить запись, а также просматривать список уже записанных файлов. Здесь предусмотрены функции для удаления ненужных видео и их скачивание из хранилища на устройство пользователя для последующего просмотра, что позволяет пользователю легко организовывать свои записи и управлять уже архивированными видео.

Также важной частью приложения является взаимодействие с базой данных. На специальной форме реализованы функции для отправки запросов на добавление новых данных, таких как метаданные о записях, а также возможность редактирования и удаления существующих записей. Пользователь может видеть информацию о каждом видео, включая дату записи, длительность и другие параметры, что делает управление данными более удобным.

Приложение включает в себя механизмы обработки ошибок и уведомлений соответственно. Если, к примеру, подключение к плате ESP32 не удалось, пользователь получит соответствующее сообщение с предложением повторить попытку или проверить настройки. Это повышает уровень удобства и минимизирует вероятность недоразумений. Реализация механизмов обработки исключений и уведомлений соответствует рекомендациям по разработке безопасных мобильных интерфейсов и повышает общую надёжность клиентской части системы [13, 15].

Заключение

В ходе исследования разработана функциональная модель системы архивации видеопотока, адаптированная под ограничения микроконтроллера ESP32 (объём RAM ≤ 520 КБ, тактовая частота до 240 МГц), включая оптимизацию буферизации кадров и сегментации потока [1, 9].

Предложена 3,5-звенная клиент-серверная архитектура, в которой веб-сервер развёрнут непосредственно на контроллере. Экспериментальная проверка показала, что такой подход позволяет снизить задержку обработки запросов до 280±90 мс при сохранении полной функциональности взаимодействия с СУБД и мобильным приложением [3, 14].

Работоспособность прототипа на базе платы Ai-Thinker ESP32-CAM подтверждена при разрешении 640×480 и частоте кадров до 15 к/с. Успешность записи метаданных в СУБД составила 99,2% (496 из 500 запросов), что подтверждает надёжность механизма синхронизации при нестабильном соединении [4, 11].

Сравнительный анализ показал преимущества предложенного решения:

— снижение массы на 82% и энергопотребления на 40–45% по сравнению с аналогами на базе Raspberry Pi;

— снижение стоимости аппаратной части в 4–6 раз относительно коммерческих решений;

— сохранение достаточной функциональности для задач мобильной архивации видеопотока [1, 3, 5].

Научная новизна работы заключается в:

1) адаптации алгоритма архивации под ограниченные ресурсы микроконтроллера с оптимизацией использования оперативной памяти;

2) интеграции веб-сервера и СУБД-клиента в единую прошивку, исключающую необходимость в промежуточном ПО;

3) разработке механизма надёжной синхронизации метаданных с автоматическим восстановлением при разрывах соединения [1, 4, 6].

Практическая значимость состоит в возможности применения разработанной системы в составе мобильных охранных комплексов, бортовых систем БПЛА, автомобильных видеорегистраторов и персональных устройств видеозаписи, где критичны массогабаритные показатели и энергоэффективность [2, 7, 10].

Перспективы дальнейших исследований включают:

— внедрение программного кодирования H.264 с использованием оптимизированных библиотек для снижения объёма хранимых данных;

— поддержку шифрования видеопотока для повышения уровня безопасности передачи и хранения [10, 15];

— интеграцию алгоритмов детекции движения на базе TinyML для интеллектуальной фильтрации записываемого контента [1, 9].

Список литературы:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024661253 Российская Федерация. Программный комплекс для считывания, сжатия и архивации видеопотока для беспилотных систем на базе контроллера ESP32 : № 2024660274 : заявл. 06.05.2024 : опубл. 16.05.2024 / Н. А. Зимин. – EDN GJFPCV.

2. Sudaryanto A., Sasongko D., Kridoyono A., Budiarti R.P.N., Mahadewi S.T., Arvianto F.A. Espcam control using Telegram on ESP32 microcontroller-based security camera systems // Applied Technology and Computing Science Journal. 2022. Т. 5. № 2. С. 21-32. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=58974340 (дата обращения: 03.04.2026)

3. Gardeva T., Nikolova N., Dinev D. Video monitoring with ESP32 // Science, Engineering and Education. 2024. Т. 9. № 1. С. 13-16. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=79214601 (дата обращения: 07.04.2026)

4. Николюкин М.С., Обухов А.Д. Адаптивная обработка видеопотока, полученного с камер, при ограничениях на пропускную способность сети передачи данных // Информационные технологии. 2024. Т. 30. № 5. С. 252-260. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67219751 (дата обращения: 09.04.2026)

5. Петров Д.А., Землянухин П.А., Сердюков П.С., Забабурина Т.Н., Бедикян Д.Р. Создание беспроводного модуля управления системы "Умный дом" на основе микроконтроллера ESP32 // Сб. статей Междунар. научно-практической конференции "Современные технологии: проблемы инновационного развития". 2019. С. 171-180. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41555949 (дата обращения: 11.04.2026)

6. Иванов А.Н., Мигурин А.В., Галанина Н.А. Настройка микроконтроллера ESP32 в качестве точки доступа // Информатика и вычислительная техника: сб. научных трудов. Чебоксары, 2024. С. 161-164. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=76076385 (дата обращения: 12.04.2026)

7. Зотин А.Г., Пахирка А.И., Буряченко В.В. Разработка системы видеонаблюдения с возможностью улучшения визуального качества видеопотока // Программные продукты и системы. 2013. № 2. С. 52. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19687464 (дата обращения: 14.04.2026)

8. Захаров С.Е., Оленюк А.А. Модель взаимодействия с многоресурсными приложениями на основе видеопотока // Молодежный научный вестник. 2018. № 6 (31). С. 62-68. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35356016 (дата обращения: 14.04.2026)

9. Тарбаев Б.Б., Калайда В.Т. Выделение объекта в видеопотоке в различных условиях освещения // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению "Графикон". 2018. № 28. С. 467-470. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37157802 (дата обращения: 15.04.2026)

10. Кравцов А.Ю. Способ обработки видеопотока в системе видеонаблюдения: патент на изобретение RU 2676950 C1, 11.01.2019. Заявка № 2018110865 от 27.03.2018. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37349022 (дата обращения: 15.04.2026)

11. Microsoft SQL Server 2012 [Текст] : [наиболее полное руководство] / Александр Бондарь. - Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2013. - 598 с. : ил., табл.; 24 см. - (В подлиннике).; ISBN 978-5-9775-0501-7

12. Дейт К.Дж. Введение в системы баз данных. 8-е изд. М.: Вильямс, 2005. 1327 с.

13. Колисниченко Д.Н. Программирование для Android. Самоучитель. 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2021. 416 с.

14. Гарайс Э.В., Винников М.Д. Разработка веб-сервера для мобильного приложения с использованием Python и Flask // Современные научные взгляды в эпоху глобальных трансформаций: материалы XLII Всерос. научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 2021. С. 124-126. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47534077 (дата обращения: 20.04.2026).

15. Альбекова З.М., Журбина Ю.О. Уязвимость мобильных платформ Android, iOS // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 7-3 (18-3). С. 296-300. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25613847 (дата обращения: 20.04.2026).

УДК 005.95:658.3

Арсентьев Д. И.
Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

MCKINSEY 7S FRAMEWORK И MANAGEMENT BY WANDERING AROUND И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В УПРАВЛЕНИИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ

Аннотация. Статья исследует интеграцию модели McKinsey 7S и метода ходьбы по рабочим местам (MBWA) как мощный инструмент для улучшения управленческой эффективности в современных компаниях. Она рассматривает стратегическое структурирование и оперативный гибкий подход к управлению, позволяющий компаниям достигать целей более эффективно и адаптироваться к изменениям внешней среды. Статья предоставляет анализ ключевых элементов модели 7S (стратегия, структура, системы, совместные ценности, стиль, персонал, навыки) и описывает, как MBWA укрепляет внутреннюю коммуникацию и корпоративную культуру. Она также демонстрирует реальные случаи использования обеих моделей в таких компаниях, как General Electric, Coca-Cola и McDonald's, подчеркивая их влияние на операционную производительность и управленческую практику.

Ключевые слова: Модель McKinsey 7S, метод ходьбы по рабочим местам (MBWA), управленческая эффективность, организационные изменения, стратегическое управление, оперативное управление, внутренняя коммуникация, корпоративная культура, управленческие инновации.

Современный мир бизнеса, характеризуется быстрыми изменениями. Помимо постоянно растущей конкуренции негативное воздействие на бизнес оказывают колебания экономики.

В 1970-х и 1980-х годах американская экономика переживала трудные времена, связанные с рецессией и высоким уровнем безработицы. В поисках путей для возрождения своих компаний и восстановления былого величия, американцы обратили внимание на успешные японские корпорации.

Томас Дж. Питерс и Роберт Х. Уотерман, долгое время работавшие в известной консалтинговой фирме McKinsey & Company, провели исследование 62 ведущих и старейших крупных компаний США. Они отобрали 43 из них по критериям рентабельности и скорости роста.

Эти компании включали таких гигантов, как IBM, Texas Instruments, Hewlett-Packard, McDonald's, Kodak и DuPont, которые стали примером для подражания в своих отраслях. На основе анализа их деятельности Питерс и Уотерман разработали модель 7S, которая стала важным инструментом для улучшения управления и повышения эффективности компаний. [1]

Модель 7S, включает в себя семь элементов, неразрывно связанных между собой: структуру, совместные ценности, стиль, персонал, стратегию, системы и навыки.

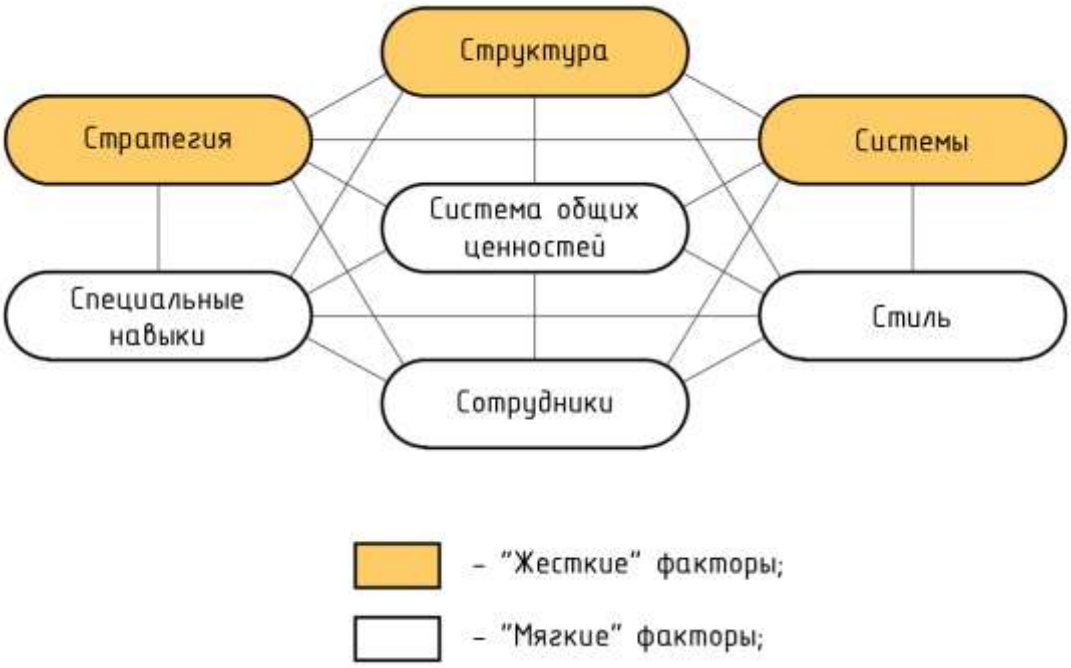


Рис. 1. Элементы структуры 7S McKinsey

Данная модель может помочь организациям в диагностике и оптимизации внутренних аспектов для достижения стратегических целей. [2]

Метод ходьбы по рабочим местам (MBWA) в свой очередь представляет более неформальный подход к управлению. Метод подразумевает наблюдение руководителей за работой сотрудников непосредственно на рабочих местах, также необходимо поддерживать контакт, выслушивать пожелания и предложения, касательно организации рабочих моментов.

Актуальность изучения взаимодействия данных моделей возникает в результате появления потребности в интеграции стратегического и оперативного управления. Исследование того, как эти два подхода могут взаимно усиливать друг друга, позволит организациям более эффективно использовать свои внутренние ресурсы для адаптации и достижения конкурентного преимущества.

Теоретические основы

Модель McKinsey 7S – разработана консультационной компанией McKinsey & Company в 1980-х годах. Представляет собой инструмент для анализа и планирования организационных изменений. В состав модели входит семь элементов, определяющих возможность эффективного достижения целей. Элементы делятся на «мягкие» и «жесткие» факторы (рис. 1). [3]

«Жёсткие» факторы – конкретные, структурированные и легко измеримые факторы.

«Мягкие» факторы – менее конкретные и более субъективные элементы, которые гораздо сложнее точно измерить и изменить.

Сами факторы имеют следующее значение:

1. Стратегия (Strategy): План действий компании на достижение долгосрочных целей.
2. Структура (Structure): Организационная структура, определяющая, как задачи распределяются, кто кем руководит и как осуществляется координация.
3. Системы (Systems): Ежедневные процедуры и процессы, необходимые для выполнения работы.
4. Совместные ценности (Shared Values): Центральные убеждения и отношения, которые являются основой культуры организации.
5. Стиль (Style): Стиль лидерства, принятый в организации.
6. Персонал (Staff): Сотрудники и их общие возможности.
7. Навыки (Skills): Способности сотрудников, которые они применяют на работе. [4]

Преимущества этой модели заключаются в том, что она помогает различным подразделениям компании действовать слаженно и синхронизировано, а также обеспечивает эффективный контроль над изменениями в ключевых аспектах. Эта модель уже доказала свою эффективность и была принята многими организациями.

Однако у этой модели есть и недостатки. Она ориентирована на долгосрочное планирование, но изменчивость бизнес-среды может вызвать проблемы с адаптацией. Кроме того, модель фокусируется на внутренних факторах и процессах, что может сделать её менее эффективной в условиях влияния внешних обстоятельств на организацию.

Однако, несмотря на явные преимущества, модель McKinsey 7S имеет и свои ограничения. В первую очередь, она ориентирована на долгосрочное планирование, что может стать проблемой в условиях высокой динамичности внешней среды. Часто изменения на рынке, такие как новые технологии, конкурентные угрозы или изменения в законодательстве, требуют более гибких и быстрых решений, в то время как модель 7S может быть слишком статичной для таких быстрых адаптаций. Кроме того, модель ориентирована преимущественно на внутренние процессы, что ограничивает ее эффективность в условиях воздействия внешних факторов, таких как экономические или политические изменения.

Эти недостатки можно нивелировать путем более гибкого применения модели, учитывая изменчивость внешней среды. Например, регулярный пересмотр стратегии и адаптация структуры и систем в ответ на изменения внешнего мира может помочь организации оставаться конкурентоспособной. Важно также понимать, что модель 7S не является универсальной и требует дополнительной настройки под конкретные условия и особенности каждой компании. [5]

Метод ходьбы по рабочим местам (Management by Walking Around, MBWA) – стиль управления, стимулирующий неформальной взаимодействие

между руководством и сотрудниками. Данный метод нашёл популярность в 1970-х годах в Helwett-Rackard после чего стал активно использоваться многими руководителями. Основные принципы MBWA включают:

1. Непосредственное общение: Руководители на постоянной основе посещают рабочие места сотрудников, чтобы лучше понимать их задачи, а также выявлять возможные проблемы.
2. Неформальное взаимодействие: Такие посещения предрасполагают к открытому общению и получению обратной связи от сотрудников
3. Принятие решений на месте: В случае выявления проблем, руководитель может своевременно отреагировать на образовавшуюся ситуацию, либо рассмотреть предложение сотрудника. [6]

Исследование взаимосвязи между 7S и методом MBWA, может выявить способность неформальных методов управления (MBWA) влиять на «Мягкие» элементы модели 7S (стиль, персонал, совместные ценности). Такой тандем может благоприятно сказаться на обстановке в компании и поспособствовать созданию более вовлеченной рабочей среды, что в дальнейшем могло бы оказать положительное влияние на «жёсткие» элементы модели (стратегия, структура, системы).

Для более глубоко понимания того, как модель McKinsey 7S и MBWA могут влиять на эффективность организации необходимо произвести анализ нескольких, случаев из реальных организаций, которые применяли McKinsey 7S и MBWA, либо подобные им модели.

Анализ реальных случаев использования модели 7S

General Electric использовала модель McKinsey 7S во время масштабной трансформации компании. Особое внимание было уделено выравниванию стратегии, структуры, а также других элементов модели. Итогом внедрения модели стало повышение операционной эффективности и улучшение финансовых показателей, повышение стоимости для акционеров.

Coca-Cola также применяла 7S для оптимизации маркетинговых стратегий. Реорганизация отдела маркетинга, а также инвестиции в повышение квалификации и развитие навыков сотрудников позволили компании повысить свою гибкость и улучшить взаимодействие с клиентами. [7]

McDonald`s активно и весьма успешно использует модель, постоянная адаптация организационной структуры и системы помогает поддерживать эффективность и лидерство на рынке. Также McDonald`s проявляет постоянное внимание к общим ценностям и обучению персонала, что позволяет организации быстро подстраиваться под колебания рыночных условий.

Также хотелось бы отметить случай, когда несоответствие модели привело к краху компании. Таким примером может выступать компания Nokia. В её анализе было показано несоответствия модели 7S. В первую

очередь в стратегии, структуре и системах. Это способствовало потери доли рынка, что в конечном счёте привело к покупке компании сторонней фирмой Microsoft. [8]

Эти примеры показывают, как модель McKinsey 7S является уникальным инструментом для организационных изменений.

Анализ реальных случаев использования модели MBWA

1. Бывший гендиректор Старбакса Говард Шульц на постоянной основе посещал свои магазины, с целью обсуждения корпоративных ценностей непосредственно с сотрудниками. Данное действие помогало поддерживать высокий уровень вовлеченности персонала и соответствие работы торговых точек корпоративной стратегии.
2. Основатели HP, Уильям Хьюлетт и Дэвид Паккард активно использовали MBWA как часть стиля управления. Данный подход позволял напрямую взаимодействовать с сотрудником и обеспечивал более тесную связь руководства с текущими операциями, что, как следствие, позволяло оперативно решать проблемы на местах.
3. Дисней, Эппл и Тойота: Эти компании также применяли MBWA для повышения эффективности управления и операционной деятельности, подчеркивая важность прямого общения руководителей с сотрудниками и понимания ими реальных рабочих процессов.

Данные примеры отражают эффективность метода MBWA. Повышение эффективности коммуникаций, операционной эффективности, а также поднятие морального духа сотрудников и предоставление альтернативного взгляда руководства на повседневные дела компании – результат внедрения данной модели. [9]

Совместное использование моделей

Для повышения эффективности компании было бы эффективно использовать обе модели вместе. Далее мы предложим способ внедрения моделей 7S и MBWA на примере компании-застройщика недвижимости.

Компания-застройщик – организация, которая занимается строительством жилых, либо коммерческих зданий с целью продажи или аренды. К задачам такой компании относятся:

1. Приобретение земли.
2. Планирование и разработка проекта
3. Строительство
4. Продажа или аренда объектов
5. В некоторых случаях – управление объектом.

Чтобы повысить эффективность работы на всех этапах планирования и строительства объекта, в первую очередь необходимо провести диагностику текущего состояния организации с помощью McKinsey 7S. Определяются и анализируются все элементы модели:

- Стратегии (какие стратегические цели у компании);

- Структуры (как устроены управленческие и производственные процессы);
- Системы (какие технологии и процедуры используются);
- Ценности (какие основные ценности поддерживают культуру компании);
- Стиль (каков стиль лидерства);
- Персонал (какие компетенции и навыки у сотрудников);
- Навыки (какие умения критичны для достижения целей). [10]

После проведения анализа необходимо выявить слабые места в компании.

Следующим этапом предполагается внедрение MBWA. Руководство должно начать регулярно выходить из офисов и наблюдать работу сотрудников, с другой стороны. Тесное общение с подчиненными позволит получить обратную связь и услышать предложения и идеи по улучшению работу. Также внедрение данной модели позволит производить решение проблем на месте.

Третий этап – интеграция MBWA с элементами 7S. MBWA должно способствовать достижению стратегических целей и улучшению структурных процессов, необходимо адаптировать системы для поддержки связи и обмена информацией между руководством и персоналом. Также MBWA может использоваться для продвижения культуры открытости и сотрудничества, а также поддержки развития сотрудников с помощью обучения и коучинга в ходе MBWA.

Четвертый шаг – Мониторинг и адаптация. Регулярный анализ того, как внедрение MBWA влияет на достижение целей и улучшения внутренних процессов. В зависимости от меняющихся условий необходима корректировка моделей.

Пример совместного использования моделей в компании-застройщика недвижимости N.

Руководство компании N провело диагностику и анализ текущего состояния организации согласно модели управления McKinsey 7S. В результате анализа были выявлены следующие слабые места:

- Системы (Использование устаревших технологий: не внедрено BIM проектирование, отсутствие альтернативного ПО взамен иностранного);
- Навыки (Сотрудники не имеют необходимых знаний: часть сотрудников не изучало системы автоматизированного проектирования, поэтому она работает с бумажными чертежами, что сильно снижает эффективность и скорость выполнения задач);
- Структуры (Управленческие и производственные процессы не налажены, отсутствует взаимосвязь между смежными отделами, что приводит к неэффективному выполнению задач, замедлению хода решения рабочих вопросов, требующих вовлеченность нескольких отделов).

Согласно предложенной нами методике руководство компании начало внедрять модель MBWA. В ходе общения с сотрудниками и получения обратной связи руководство выяснило следующее:

1. Часть сотрудников хотят проходить курсы повышения квалификации и готовы к получению новых навыков, но не могут себе это позволить в силу загруженности графика и высокой стоимости курсов.
2. Несколько сотрудников предложили вести общую систему задач, которая позволила бы систематизировать поставленные им задачи.
3. Было предложено проведение еженедельных планерок, в ходе которых могли бы решаться вопросы, которые требуют участия сотрудников с различных отделов.
4. Также были выявлены мелкие проблемы и пожелания отдельных сотрудников, которые были решены руководством на месте. (Отсутствие кофемашины, недостаток канцелярских принадлежностей.)

На основе полученной информации руководство решило периодически отправлять сотрудников на курсы повышения квалификации, в том числе по работе с BIM-технологиями, что позволило внедрить информационное моделирование (BIM).

Была введена система задач, которая позволит не только сотрудникам отслеживать собственные задачи, но и руководству отслеживать своевременное выполнение поставленных задач, а также отслеживать эффективность работы, как отдельного сотрудника, так и целого отдела.

Было принято решение о проведении еженедельных планёрок, в ходе которых будут решаться вопросы между сотрудниками смежных отделов.

В дальнейшем руководство будет и дальше производить мониторинг эффективности, что позволит в дальнейшем при обнаружении проблем адаптировать новые подходы, основываясь на меняющиеся условия и полученную обратную связь.

В итоге интеграция модели McKinsey 7S и метода ходьбы по рабочим местам (MBWA) позволило существенно улучшить управление и операционную эффективность компании. Были проработаны слабые места, выявленные в первоначальном анализе и решены более мелкие проблемы, которые были выявлены в ходе «ходьбы по рабочим местам». Важно в дальнейшем продолжать использование данных моделей, так получится достичь гораздо большей эффективности.

Заключение

Интеграция модели McKinsey 7S и метода ходьбы по рабочим местам (MBWA) представляет собой мощный инструментарий для улучшения управленческой эффективности и операционной производительности в современных компаниях. Это сочетание стратегического структурирования и оперативного гибкого подхода позволяет организациям не только достигать своих целей более эффективно, но и адаптироваться к постоянно изменяющимся условиям внешней среды.

Модель 7S предоставляет рамки для комплексного анализа ключевых аспектов организации, включая стратегию, структуру, системы, совместные ценности, стиль, персонал и навыки. Она помогает управленцам осознать, как каждый из этих элементов взаимодействует друг с другом и влияет на общую работу компании.

Метод MBWA дополняет этот анализ, предлагая руководителям непосредственное общение с сотрудниками, что способствует более быстрому и эффективному решению проблем, улучшению внутренней коммуникации и укреплению корпоративной культуры. Регулярное взаимодействие с персоналом на рабочих местах позволяет лидерам получать актуальную информацию о том, какие процессы работают успешно, а какие требуют изменений или улучшений.

Совместное использование модели 7S и MBWA может трансформировать организацию, сделав её более приспособленной к решению как текущих, так и долгосрочных задач, обеспечивая тем самым устойчивое развитие и конкурентное преимущество на рынке. В конечном счёте, это подход, который стимулирует не только качественный рост и развитие бизнеса, но и способствует созданию более здоровой и мотивированной рабочей среды.

Список литературы:

1. McKinsey 7S Framework — С Соответствующими Примерами, Шаблонами И Инструментами [электронный ресурс] – Режим доступа: https://blog.visual-paradigm.com/ru/the-mckinsey-7s-framework-with-related-examples-templates-and-tools;
2. The McKinsey 7-S Model for Organizational Alignment and Success [электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.thestrategyinstitute.org/insights/the-mckinsey-7-s-model-for-organizational-alignment-and-success;
3. Pascale, R.T., & Athos, A.G. (1981). The Art of Japanese Management: Applications for American Executives. Simon and Schuster C. 12-13. [текст];
4. Nhancing Organizational Success: A Deep Dive into the McKinsey 7S Model with Real-Life Case Studies Success [электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.marketingeyeatlanta.com/blog/management/enhancing-organizational-success-a-deep-dive-into-the-mckinsey-7s-model-with-real-life-case-studies.html;
5. Работает ли ваша компания идеально? Модель McKinsey 7S [электронный ресурс] – Режим доступа: http://powerbranding.ru/biznes-analiz/mckinsey-7s-model;
6. Kaplan, R.S., Norton, D.P. (1996). The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action. C. 27-28 [текст];
7. Урок 6. Методики и подходы для системного решения проблем [электронный ресурс] – Режим доступа: https://4brain.ru/solution/systematic.php;
8. Инструмент: управление методом «Ходьбы в народ», 7 принципов Тома Питерса и меры предосторожности 7S [электронный ресурс] – Режим доступа: https://b-solutions.ru/lib/ii_mbwa1.html;
9. Управление по методу блуждания вокруг. Оставаться на связи с командой [электронный ресурс] – Режим доступа: https://hr-elearning.ru/upravlenie-po-metodu-bluzhdaniya-vokrug;

10. Модель McKinsey 7S: ключ к успешному организационному дизайну [электронный ресурс] – Режим доступа: https://andata.ru/blog/marketing/chto-takoe-model-makkinsi-7s.

11. Артыщенко С.В., Баркалов С.А., Баев С.А., Серебрякова Е.А., Панфилов Д.В. Использование парадокса Монти Холла в задачах управления проектами. Часть I. Оптимальный выбор стратегии повышения инновационного потенциала предприятия // Инженерный вестник Дона. 2023. № 10. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8748

12. Артыщенко С.В., Баркалов С.А., Баев С.А., Серебрякова Е.А., Панфилов Д.В. Использование парадокса Монти Холла в задачах управления проектами. Часть II. Применение в комбинации с моделями игр Блотто. Задача со случайной разведкой // Инженерный вестник Дона. 2023. № 12. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8891

13. Артыщенко С.В., Серебрякова Е.А., Артыщенко И.С., Баев С.А., Радинская Е.И. Инновациоый потенциал предприятия: структура, значение, влияющие факторы // Проектное управление в строительстве. 2023. № 4. С. 60-68.

14. Дьяконова С.Н., Артыщенко С.В., Баев С.А., Гусев М.В. Исследование динамики развития инновационных процессов с помощью логистического уравнения Ферхюльста// ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. 2022. Т. 19. № 4. С. 80-84.

15. Дьяконова С.Н., Артыщенко С.В., Щетинин Н.В., Мартиросян Д.Г. Исследование проблем осуществления инновационной деятельности на предприятиях строительной сферы// Инновации, технологии и бизнес. 2021. № 2 (10). С. 47-52.

16. Артыщенко С.В., Батехова А.А., Горюшкин К.Н., Гусев М.В. Особенности и новые возможности повышения инновационного потенциала предприятий РФ в свете ухода с рынка иностранных компаний // Инновации, технологии и бизнес. - 2024. - № 1 (15). С. 9-14.

17. Партисипативное управление как инновационная модель управления инновационным потенциалом предприятия и как способ его повышения / С. В. Артыщенко, С. А. Баев, И. С. Артыщенко, М. В. Гусев, Е. И. Радинская // Проектное управление в строительстве : научный журнал. – Воронежский государственный технический университет, 2024. – Вып. 1 (30). – С. 21-30.

УДК 004.9:37

Борзов Д. О.
Научный руководитель: Плотников С. Б., к.т.н., доцент
МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

О РАЗРАБОТКЕ ГЕЙМИФИЦИРОВАННОЙ МУЛЬТИМЕДИЙНОЙ КРОССПЛАТФОРМЕННОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С АДАПТИВНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ ПОДДЕРЖКИ ВНИМАНИЯ

Аннотация. В статье обоснована актуальность разработки мультимедийной кроссплатформенной образовательной платформы, объединяющей автоматическую генерацию учебных материалов из произвольных пользовательских источников и развитую систему геймификации. На основе анализа современных тенденций EdTech, ограничений существующих решений и особенностей восприятия информации современными обучающимися сформулированы цель, задачи и функциональные требования. Особое внимание уделено авторским механизмам адаптации к «клиповому» мышлению: динамическому наращиванию объёма текста в квестовых заданиях, учёту времени глубокого чтения и балансу внешней и внутренней мотивации. Предлагаемый подход направлен на повышение устойчивой вовлечённости, формирование прикладных навыков и поддержку непрерывного самообразования.

Ключевые слова: EdTech, геймификация, адаптивное обучение, клиповое мышление, мотивация, цифровые образовательные платформы, глубокое чтение, квестовая модель обучения.

Введение

Современный рынок электронного обучения демонстрирует устойчивый рост: по прогнозам на 2026 год объём глобального сегмента e-learning оценивается в диапазоне 350–500 млрд долларов США с дальнейшим увеличением до 800 млрд к 2033 году [1, 2]. Основными драйверами роста выступают интеграция искусственного интеллекта для персонализации, распространение коротких модульных форматов и усиленное внимание к удержанию внимания пользователей в условиях цифровой перегрузки.

При этом традиционные подходы к онлайн-обучению сохраняют серьёзные ограничения. “Знаниевый формат”, ориентированный на пассивное потребление контентом материала, слабо способствует формированию прикладных навыков и устойчивой мотивации. Как отмечают исследователи, в быстро меняющейся профессиональной среде ключевой компетенцией становится способность к непрерывному самообучению (lifelong learning), однако существующие платформы часто не обеспечивают достаточной эмоциональной вовлечённости и регулярной практики [3].

Особую актуальность приобретает проблема «клипового» восприятия информации у «цифрового поколения»: привычка к коротким фрагментам контента затрудняет работу с объёмными текстами и глубокое осмысление материала [4]. В этих условиях перспективным направлением становится

интеграция автоматической генерации практико-ориентированных заданий из пользовательских материалов с продуманными геймификационными механизмами, адаптированными к особенностям современной аудитории.

Настоящая работа посвящена постановке задачи разработки комплексной образовательной платформы, сокращающей разрыв между технологическими возможностями генерации контента и педагогическими потребностями поддержки мотивации и внимания.

1. Современные тенденции и ограничения EdTech-решений

Ключевые тенденции 2025–2026 годов в сфере цифрового образования включают:

– широкое внедрение технологий искусственного интеллекта для автоматической обработки и трансформации учебных материалов;

– рост популярности адаптивных траекторий и коротких учебных модулей (3–10 минут);

– усиление роли геймификации как инструмента повышения вовлечённости и удержания пользователей [5, 6].

Исследования подтверждают эффективность геймификации: правильно спроектированные игровые элементы повышают мотивацию, концентрацию и академические результаты, особенно в сочетании с интервальным повторением [7, 8].

Однако анализ рынка, приведённый в 1 таблице далее, выявляет функциональный разрыв. Платформы с развитой автоматической генерацией материалов (конспекты, карточки, тесты из загруженных файлов различных форматов) обычно обладают низким уровнем мотивационной поддержки. В свою очередь, высоко геймифицированные сервисы (викторины, соревновательные режимы и т.п.) требуют ручного создания контента и не работают с произвольными пользовательскими источниками.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика основных EdTech-решений

Группа платформ	**Автоматическая генерация из пользовательских файлов**	**Развитая геймификация**	**Интервальное повторение**
AI-ориентированные (NotebookLM, аналоги)	Высокий уровень	Низкий	Отсутствует/ограничено
Геймифицированные викторины (Kahoot!, Quizizz)	Отсутствует	Высокий уровень	Отсутствует
Комплексные решения	Отсутствуют или фрагментарны	Отсутствуют или фрагментарны	Отсутствуют

Таким образом, на рынке отсутствует решение, обеспечивающее полный цикл самостоятельного обучения: от загрузки произвольных материалов до их

автоматического преобразования в адаптивные практические активности с долгосрочной мотивационной поддержкой.

2. Предлагаемый подход

Предлагаемая платформа объединяет два признанных направления современных EdTech-решений:

1. Автоматическую генерацию разнообразных учебных активностей (карточки, квизы, практические кейсы) из загруженных пользователем файлов различных форматов (PDF, текст, изображения, презентации, аудио).

2. Развитую систему геймификации, включающую проверенные механики (очки, бейджи, уровни, прогресс-бары, лидерборды) и авторские адаптации к особенностям «клипового» мышления.

2.1 Новизна предлагаемого решения связана с интеграцией следующих элементов:

1. Квестовая модель обучения с адаптивным наращиванием объёма текста. После каждого небольшого информационного блока следует быстрый контрольный вопрос в форме режима “глубокое чтение”. Механизм динамически увеличивает длину предъявляемых фрагментов в зависимости от текущих успехов и концентрации пользователя, постепенно формируя навык работы с объёмными текстами и противодействуя фрагментарности восприятия.

2. Учёт и ранжирование времени глубокого чтения. Суммарные часы активного обучения становятся самостоятельной метрикой прогресса и соревновательным элементом, стимулируя регулярность и продолжительность занятий.

3. Баланс внешней и внутренней мотивации. Сочетание соревновательных элементов (лидерборды, очки) с личностно-ориентированными стимулами (персональные бейджи, накопление часов, индивидуальные цели) позволяет удерживать разные типы обучающихся и предотвращать демотивацию при временных неудачах.

Ожидаемый эффект: повышение устойчивой вовлечённости, лучшее закрепление материала за счёт постепенного усложнения и формирование привычки к глубокому чтению без перегрузки внимания.

3. Функциональные требования к платформе

На основе проведённого анализа разрабатываемая система должна обеспечивать следующие функциональные требования:

– загрузку и обработку файлов различных форматов (PDF, текст, изображения, презентации, аудио);

– автоматическую генерацию разнообразных учебных активностей (flashcards, квизы, практические сценарии);

– развитую геймификационную подсистему:

- начисление очков и бейджей за выполнение заданий;
- уровни и прогресс-бары для визуализации индивидуального продвижения;
- лидерборды по очкам и накопленным часам активного обучения;

– квестовую модель с адаптивным наращиванием объёма текста и промежуточными контрольными вопросами;

– элементы социального взаимодействия (просмотр и оценка открытых курсов других пользователей);

– механизм учёта времени глубокого чтения/выполнения заданий с ранжированием;

– кроссплатформенность (мобильные устройства iOS/Android и веб);

– открытый REST API для интеграций с внешними системами.

Нефункциональные требования включают высокую надёжность, масштабируемость, защиту данных и «бесшовный» пользовательский опыт на всех платформах.

4. Стратегия разработки платформы

Стратегия разработки платформы строится на последовательном усложнении взаимодействия пользователя с контентом. Логика системы описывается переходом от базовой доступности материалов к формированию устойчивых когнитивных привычек через игровые механики.

4.1. Базовая интеграция: унификация контента

Если разнородные пользовательские материалы (лекции, PDF-файлы, заметки и т.п.) поместить в единую кроссплатформенную среду то, будет создано централизованное хранилище знаний, доступное для любого устройства. Однако, такой контент предполагает «пассивное» чтение, что зачастую приводит к потере внимания и интереса. Чтобы сделать процесс взаимодействия более эффективным, на первом этапе реализуется алгоритмическая фрагментация: система программно разбивает загруженный массив информации на смысловые информационные блоки (темы), превращая линейный текст в дискретную структуру, готовую к интерактивной обработке.

4.2. Трансформация в игровой цикл (Core Loop)

Далее, с помощью внедрения механик «быстрой обратной связи», полученные фрагменты преобразуются в учебные цепочки. Каждый информационный блок завершается обязательным интерактивным действием (проверочным вопросом, выбором варианта, сопоставлением) в режиме «глубокого чтения». Это позволяет перевести пользователя из режима «наблюдателя» в режим «игрока». Система фиксирует факт прохождения каждого этапа, что дает возможность визуализировать прогресс и мгновенно вознаграждать за малые усилия, закрывая потребность пользователя в ощущении постоянного продвижения вперед.

4.3. Адаптация сложности и борьба с клиповым мышлением

Чтобы не допустить привыкания к слишком коротким заданиям, в архитектуру вводится механизм динамического масштабирования контента. Анализируя поведение пользователя (скорость ответов, отсутствие ошибок), система изменяет параметры подачи материала:

- при высокой результативности платформа автоматически увеличивает объем текстового блока в следующей итерации «глубокого чтения», требуя более длительной концентрации;

- при снижении показателей, объем текста уменьшается, возвращаясь к более простым формам.

Таким образом, геймификация здесь выступает не просто как внешняя оболочка, а более как регулятор когнитивной нагрузки, тем самым, незаметно для обучающегося тренируя навык работы с большими объемами данных.

4.4. Достижение синергии мотиваций

В результате объединения механик внешней (лидерборды, бейджи за серии побед) и внутренней мотивации (накопление личного времени «глубокого фокуса») удается добиться синергетического эффекта. Предлагаемый подход позволяет трансформировать рутинное повторение материала в увлекательный процесс «прокачки» персонального профиля. Это, в свою очередь, обеспечивает:

- удержание в системе. Игровой цикл стимулирует регулярные возвращения;

- качество усвоения. Адаптивное усложнение не дает пользователю скучать (если слишком легко) или фрустрировать (если слишком сложно), удерживая его в состоянии «потока».

Таким образом, разработанная стратегия позволяет перейти от простой «читалки» файлов к адаптивному тренажеру, который использует игровые правила для формирования серьезных академических навыков.

5. Границы применимости и направления дальнейших исследований

Предлагаемое решение наиболее эффективно в сценариях самостоятельного и дополнительного образования, корпоративного апскейлинга, модульного обучения гуманитарным и техническим дисциплинам, где возможно автоматическое формирование практических заданий из текстовых и мультимедийных источников.

Ограничения связаны с предметными областями, требующими физических экспериментов, сложного оборудования или строгой сертификации. В таких случаях платформа может выступать вспомогательным инструментом.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на эмпирическую валидацию эффективности авторских механизмов (рандомизированное контролируемое исследование с измерением удержания, времени на заданиях и субъективной вовлечённости), совершенствование адаптивных алгоритмов и расширение социальных функций.

Заключение

Проведённый анализ подтверждает актуальность разработки комплексной геймифицированной образовательной платформы, сокращающей разрыв между возможностями автоматической обработки материалов и потребностью в устойчивой мотивации современных обучающихся. Предлагаемое решение, благодаря интеграции проверенных геймификационных механик с авторскими адаптациями к «клиповому» мышлению, создаёт условия для формирования не

только знаний, но и навыков глубокого чтения, регулярной практики и внутренней мотивации к непрерывному самообразованию. Сформулированные требования образуют основу для последующей архитектурной проработки и реализации прототипа.

Список литературы:

1. E-Learning Market Growth, Size, and Business Forecast 2026-2033 // SkyQuest Technology. – 2026. – URL: https://www.skyquestt.com/report/e-learning-market (дата обращения: 18.01.2026).

2. Growth Opportunities in the $2.28 Trillion E-Learning Market, 2035 // BusinessWire. – 2026. – URL: https://www.businesswire.com/news/home/20260113422714/en/ (дата обращения: 18.01.2026).

3. Ивашкевич Е. Вселенная Плюс: фрагменты подкаста // YouTube. – 2025. – URL: https://www.youtube.com/watch?v=ytgWF6hFF80 (дата обращения: 18.01.2026).

4. Фрумкин К.Г. Глобальные изменения в мышлении и судьба текстовой культуры // Информационное общество. – 2010. – № 4. – С. 26–36.

5. EdTech Trends in 2026: How Intelligence will Redefine Learning // TCS. – 2026. – URL: https://www.tcs.com/what-we-do/industries/education/article/edtech-trends-2026-intelligence-redefining-learning-systems (дата обращения: 18.01.2026).

6. AI and Gamification: Powering Student Success // edCircuit. – 2025. – URL: https://edcircuit.com/ai-and-gamification-powering-student-success (дата обращения: 18.01.2026).

7. Gamification in Education: Effectiveness and Impact on Student Motivation // ResearchGate. – 2025. – URL: https://www.researchgate.net/publication/391417521_Gamification_in_Education_Effectiveness_and_Impact_on_Student_Motivation (дата обращения: 18.01.2026).

8. The role and scope of gamification in education: A scientometric analysis // PubMed. – 2025. – URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40850223 (дата обращения: 18.01.2026).

УДК 519.816

Чередниченко И. Л.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

МЕТОД АНАЛИТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СААТИ, ЭНТРОПИЙНЫЙ И ФРАКТАЛЬНЫЙ ПОДХОДЫ КАК ИНСТРУМЕНТАРИЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ НИОКР-ПРОЕКТОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СОСТАВОМ ПОРТФЕЛЯ

Аннотация. Цель работы – предложить комплексный теоретический инструментарий для многокритериальной оценки проектов НИОКР, объединяющий метод аналитических сетей, энтропийное взвешивание и фрактальный анализ. Актуальность исследования обусловлена спецификой научно-исследовательских и опытно-конструкторских проектов: высокой неопределённостью, сильной взаимозависимостью критериев, разнообразием структурной сложности и необходимостью одновременного учёта экспертных суждений и объективных данных. Новизна подхода заключается в синтезе трёх разноплановых аналитических аппаратов и дополнении их положениями теории самоорганизованной критичности, что позволяет не только ранжировать проекты по интегральной полезности, но и контролировать каскадные риски портфеля. Показано, что совместное применение экспертно-сетевых, энтропийных и фрактальных метрик повышает устойчивость процедуры упорядочения проектов и устраняет ограничения, присущие изолированному использованию каждого из методов. В работе описаны ключевые принципы предлагаемого инструментария и обоснована его применимость для формирования сбалансированных портфелей НИОКР.
Ключевые слова: метод аналитических сетей, многокритериальная оценка, портфель НИОКР, фрактальный подход, энтропийный подход.

Введение.

Управление портфелем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) занимает особое место в системе инновационного менеджмента, поскольку именно от состава и качества реализуемых проектов зависит долгосрочная конкурентоспособность технологических компаний и научных организаций. В отличие от инвестиционных или строительных проектов, проекты НИОКР характеризуются рядом принципиальных особенностей, которые превращают их отбор в сложную многокритериальную задачу с высоким уровнем неопределённости.

Прежде всего, каждый НИОКР-проект обладает уникальной комбинацией параметров, многие из которых трудно формализовать. Стратегическая значимость, научная новизна, степень технологической реализуемости, патентная чистота, ожидаемый эффект – все эти характеристики, как правило, выражаются не столько в точных числах, сколько в экспертных суждениях, часто носящих качественный характер. При этом оценки различных экспертов могут

съществено расходиться, что привносит в процедуру отбора значительную долю субъективности.

Вторая особенность – глубокая взаимозависимость критериев и самих проектов. Высокая научная новизна, являясь желательным свойством, одновременно повышает неопределённость и вероятность технического провала, что увеличивает риски. Технологическая реализуемость, напротив, снижает ресурсные риски, но может ограничивать амбициозность результата. Кроме того, внутри портфеля проекты редко бывают изолированными: они конкурируют за одни и те же кадровые и материальные ресурсы, используют общую экспериментальную базу, а результаты одного проекта нередко служат входными данными для другого. Такая сеть взаимовлияний не улавливается классическими линейными моделями оценки.

Третья особенность – структурная неоднородность проектов. Один и тот же ожидаемый научно-технический результат может достигаться как в рамках компактного проекта с ограниченным числом этапов и соисполнителей, так и в виде масштабной распределённой программы со сложной сетевой структурой работ. Разная внутренняя сложность напрямую влияет на управляемость: чем более разветвлён проект, тем труднее его координировать, прогнозировать сроки и бюджет, тем выше вероятность каскадных сбоев при локальных отклонениях. Традиционные критерии (чистая приведённая стоимость, внутренняя норма доходности) не чувствительны к этим различиям, что может приводить к отбору проектов с высокими формальными показателями, но низкой реальной управляемостью.

Наконец, портфель НИОКР представляет собой динамическую систему, склонную к самоорганизованной критичности. Накопление нагрузки в виде сжатых сроков, дефицита квалифицированных кадров или одновременного выполнения множества взаимосвязанных проектов способно привести портфель в состояние, когда даже незначительное локальное возмущение (срыв этапа, уход ключевого исполнителя) вызывает цепную реакцию, затрагивающую значительную часть проектов. Игнорирование этого системного эффекта чревато потерей устойчивости всего портфеля.

Перечисленные особенности делают недостаточными как простые финансовые метрики, так и многие распространённые многокритериальные методы, которые, как правило, предполагают независимость критериев, либо не предусматривают одновременного учёта экспертных связей, объективной информативности данных и структурной сложности объектов. В связи с этим в научной литературе активно развиваются подходы, расширяющие арсенал инструментов портфельного управления. Метод аналитических сетей (Analytic Network Process, ANP), предложенный Т. Саати [1], позволяет моделировать сложные сети взаимовлияний между критериями и альтернативами, что впервые дало возможность адекватно отразить внутренние зависимости проектов НИОКР. Энтропийный подход, заимствованный из теории информации, позволяет объективизировать веса критериев, опираясь исключительно на

степень различимости проектов по имеющимся данным [2, 3], и тем самым частично компенсировать субъективность экспертных оценок. Фрактальный анализ, изначально разработанный для описания природных неоднородных структур, всё чаще применяется для количественной оценки сложности организационных и проектных систем [4, 5], давая в руки исследователя метрику структурной неоднородности. Дополнительным импульсом к комплексному рассмотрению служит модель самоорганизованной критичности, описывающая поведение сложных систем вблизи критического порога [6].

Несмотря на значительный прогресс в каждом из названных направлений, их совместное целенаправленное применение к задаче многокритериальной оценки НИОКР-проектов остаётся практически неисследованным. Как правило, работы фокусируются либо на экспертных, либо на энтропийных, либо на фрактальных аспектах, не предлагая единого инструментария, который позволил бы формировать портфель, сбалансированный по полезности, объективности, структурной управляемости и устойчивости к каскадным рискам.

Цель настоящей статьи – разработать теоретический инструментарий многокритериальной оценки НИОКР-проектов, интегрирующий метод аналитических сетей, энтропийное взвешивание, фрактальный анализ и элементы модели самоорганизованной критичности. В рамках статьи последовательно описываются принципы работы каждого из блоков предлагаемого аппарата, обосновывается логика их объединения и показывается, каким образом итоговая оценка проекта становится многомерной характеристикой, отражающей не только его научно-техническую и экономическую привлекательность, но и внутреннюю сложность, а также потенциальное влияние на устойчивость портфеля в целом.

Сетевая модель экспертных приоритетов.

Метод аналитических сетей, предложенный Т. Саати [1], представляет собой развитие метода анализа иерархий и предназначен для задач, в которых критерии и альтернативы связаны не только вертикальными, но и горизонтальными, а также обратными связями. В контексте НИОКР-проектов это особенно важно: высокая научная новизна, например, одновременно повышает потенциальный эффект и уровень неопределённости; технологическая реализуемость, в свою очередь, способна снижать ресурсные риски. ANP позволяет построить сетевую модель, в которой все элементы – критерии и сами проекты – рассматриваются как взаимовлияющие узлы.

Процедура начинается с выделения множества проектов-кандидатов и системы критериев, которая для задачи отбора НИОКР может включать группы стратегического соответствия, научно-технической значимости, ресурсной обеспеченности, риска и неопределённости, ожидаемого эффекта и структурной сложности. Далее эксперты проводят попарные сравнения элементов по фундаментальной шкале, формируя матрицы относительной значимости. Для каждой такой матрицы вычисляется локальный вектор приоритетов. Все локальные векторы объединяются в суперматрицу, которая после нормализации

и возведения в предельную степень даёт глобальные приоритеты критериев и альтернатив. Именно эти приоритеты служат основой для вычисления частной экспертной оценки каждого проекта.

Таким образом, ANP обеспечивает содержательную логику взаимосвязей и позволяет экспертам выразить сложные, не всегда формализуемые суждения о взаимовлиянии факторов. Однако итоговые веса остаются в значительной мере субъективными, что требует дополнения объективными метриками.

Энтропийная оценка информативности критериев.

Для снижения субъективности экспертных весов в предлагаемом инструментарии используется энтропийный подход, корни которого лежат в теории информации [2, 3]. Идея состоит в том, что критерий, по которому все проекты-кандидаты имеют примерно одинаковые оценки, несёт меньше полезной информации для различения проектов и должен получать меньший вес. Напротив, критерий, оценки по которому сильно варьируются, позволяет отчётливее дифференцировать проекты и заслуживает повышенного внимания.

Алгоритм энтропийного взвешивания включает несколько шагов. Вначале исходная матрица оценок проектов по критериям нормируется, чтобы привести значения к сопоставимому виду. Затем для каждого критерия рассчитывается его энтропия – мера неопределённости. Чем ближе энтропия к единице, тем менее выражены различия между проектами по данному критерию. На основе энтропии вычисляется степень дивергенции, которая отражает информативность критерия. Нормировка показателей дивергенции даёт объективные энтропийные веса, зависящие исключительно от структуры исходных данных, а не от мнений экспертов.

В рамках обсуждаемого инструментария энтропийные веса не заменяют экспертные, а комбинируются с ними. Интегрированный вес критерия определяется как взвешенная сумма экспертного и энтропийного весов с параметром согласования, который может настраиваться в зависимости от доверия к тем или иным данным. Такая схема особенно ценна для портфелей НИОКР, где одни показатели являются прогнозными или расчётными, а другие задаются экспертным путём.

Фрактальный анализ структурной сложности проекта.

Портфель НИОКР, как правило, содержит проекты с существенно разной внутренней структурой: одни представляют собой линейную последовательность небольшого числа этапов, другие – разветвлённую сеть взаимосвязанных задач с множеством соисполнителей. Одинаковый ожидаемый эффект может достигаться проектами, резко различающимися по сложности управления, координации и мониторинга. Традиционные экономические и экспертные критерии не улавливают эту разницу, что ведёт к недооценке рисков, связанных со сложностью. Для восполнения данного пробела привлекается фрактальный подход [4, 5].

Фрактальная размерность позволяет количественно описать степень неоднородности и разветвлённости структуры проекта. Чем сложнее иерархия

работ, чем больше внутренних взаимосвязей, тем выше значение фрактальной размерности. В управленческом плане рост этого показателя интерпретируется как увеличение структурной неоднородности, затрудняющее прогнозирование и повышающее вероятность непредвиденных задержек при локальных сбоях. Поэтому критерий структурной сложности рассматривается как дестимулирующий: при прочих равных условиях предпочтение должно отдаваться структурно более простым проектам.

В предлагаемом инструментарии фрактальный показатель может быть использован двояко: либо как самостоятельный критерий, включаемый в общую матрицу оценок, либо как коэффициент управляемости – обратная величина или иная функция от размерности. Такой коэффициент усиливает позиции проектов с низкой структурной сложностью и одновременно делает более прозрачным сравнение проектов с различной внутренней организацией.

Интегрированная процедура оценки и упорядочение проектов.

Портфель НИОКР, как правило, содержит проекты с существенно разной внутренней структурой: одни представляют собой линейную последовательность небольшого числа этапов, другие – разветвлённую сеть взаимосвязанных задач с множеством соисполнителей. Одинаковый ожидаемый эффект может достигаться проектами, резко различающимися по сложности управления, координации и мониторинга. Традиционные экономические и экспертные критерии не улавливают эту разницу, что ведёт к недооценке рисков, связанных со сложностью. Для восполнения данного пробела привлекается фрактальный подход [4, 5].

Фрактальная размерность позволяет количественно описать степень неоднородности и разветвлённости структуры проекта. Чем сложнее иерархия работ, чем больше внутренних взаимосвязей, тем выше значение фрактальной размерности. В управленческом плане рост этого показателя интерпретируется как увеличение структурной неоднородности, затрудняющее прогнозирование и повышающее вероятность непредвиденных задержек при локальных сбоях. Поэтому критерий структурной сложности рассматривается как дестимулирующий: при прочих равных условиях предпочтение должно отдаваться структурно более простым проектам.

В предлагаемом инструментарии фрактальный показатель может быть использован двояко: либо как самостоятельный критерий, включаемый в общую матрицу оценок, либо как коэффициент управляемости – обратная величина или иная функция от размерности. Такой коэффициент усиливает позиции проектов с низкой структурной сложностью и одновременно делает более прозрачным сравнение проектов с различной внутренней организацией.

Устойчивость портфеля и модель самоорганизованной критичности.

Для НИОКР-портфеля недостаточно просто отобрать проекты с наибольшей индивидуальной полезностью: высокая степень взаимозависимости работ создаёт риск каскадных сбоев, когда локальное отклонение в одном проекте порождает цепную реакцию перегрузок в связанных с ним проектах.

Този феномен добре се описва с модела на самоорганизираната критичност, според който сложните системи се самоорганизират в критично състояние, където дори малко смущение може да предизвика мащабни лавинообразни промени [6].

За отчитане на този ефект в инструментариума се въвеждат понятията текущо натоварване и критичен праг за всеки проект. Натоварването агрегира ресурсната, времевата и организационната съставяща, а прагът задава допустимото ниво, след което проектът се превръща в източник на повишен риск. Ако натоварването надвишава прага, проектът се разглежда като критично претоварен, а част от излишното натоварване се преразпределя към зависимите проекти пропорционално на коефициентите на взаимовръзка. Това преразпределение може да провокира вторични претоварвания и, като следствие, загуба на устойчивост на целия портфейл.

Като мярка за критичност се използва съотношението между текущото натоварване и прагово значение. Когато този показател е по-малък от единица, проектът е в устойчива зона; приближаването до единица сигнализира за потенциална нестабилност; надвишаването на единица показва, че проектът вече сам може да инициира каскадни рискове. Крайният приоритет на проекта може да бъде коригиран с обратната стойност на показателя за критичност, което автоматично понижава ранга на претоварените инициативи. Освен това при формирането на портфейла се въвежда ограничение върху сумарния критичен показател на всички включени проекти. То изключва комбинации, които при външно висока полезност създават вътрешно напрежение, опасно за реализацията на цялата изследователска програма.

Включването на елементите на модела на самоорганизираната критичност превръща описания инструментариум от статична процедура за ранжиране в механизъм, чувствителен към структурната динамика на портфейла. В резултат крайната оценка на проекта отразява не само неговата научно-техническа и икономическа привлекателност, но и това, доколко неговото включване дестабилизира системата като цяло.

Заключение.

Предложеният теоретичен инструментариум за многокритериална оценка на НИОКР-проекти съчетава метода на аналитичните мрежи на Саати, ентропийното претегляне и фрактален анализ, допълвайки ги с положенията на теорията за самоорганизираната критичност. Методът на аналитичните мрежи позволява да се отчете взаимното влияние на критериите и съдържателните експертни преценки, типични за наукоемките проекти. Ентропийният подход прави теглата обективни въз основа на реалните различия между проектите, намалявайки зависимостта от субективния фактор. Фракталният анализ дава количествена мярка за структурната сложност на проекта, отразяваща неговата вътрешна неоднородност и трудоемкост на управление. Съвместното използване на трите подхода преодолява едностранчивостта на традиционните методики, а параметърът за съгласуване на експертната и обективната съставящи придава гъвкавост на инструментариума.

Введение ограничений по критичности портфеля, базирующихся на модели самоорганизованной критичности, обеспечивает дополнительный фильтр, предотвращающий включение в портфель комбинаций проектов с чрезмерной внутренней напряжённостью. Итоговый показатель приоритета, корректируемый на коэффициент управляемости и показатель критичности, даёт многомерную характеристику проекта, более адекватную условиям высокой неопределённости и взаимозависимости, типичным для современных НИОКР.

Перспективы развития связаны с практической апробацией инструментария на реальных портфелях научно-исследовательских организаций, уточнением методов расчёта фрактальной размерности для различных типов проектных структур и разработкой динамической модели, позволяющей переоценивать критичность по мере выполнения проектов и перераспределения ресурсов. Предлагаемый подход может найти применение как в корпоративных R&D-центрах, так и в рамках государственных научно-технических программ, где требуется обеспечить баланс между результативностью, объективностью отбора и структурной устойчивостью портфеля.

Список литературы:

1. Принятие решений : Метод анализа иерархий / Т. Саати; Пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. - Москва : Радио и связь, 1993. - 314,[1] с. : ил.; 20 см.; ISBN 5-256-00443-3
2. Батанов Ф. А. Техническая и технико-экономическая неопределенности в НИОКР и инновационных проектах: углубленный обзор // Индустриальная экономика. 2025. №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tehnicheskaya-i-tehniko-ekonomicheskaya-neopredelennosti-v-niokr-i-innovatsionnyh-proektah-uglublennyy-obzor
3. Li, H.; Chen, R.; Zhang, X. Uncertain Public R&D Project Portfolio Selection Considering Sectoral Balancing and Project Failure. Sustainability 2022, 14, 15774. https://doi.org/10.3390/su142315774
4. Аньшин, В. М. Исследование методологии оценки и анализ зрелости управления портфелями проектов в российских компаниях : монография / В.М. Аньшин, О.Н. Ильина. — Москва : ИНФРА-М, 2022. — 202 с. — (Научная мысль). - ISBN 978-5-16-004146-9. - Текст: электронный. - URL: https://znanium.com/catalog/product/1735164
5. Доброва, Е. Д. Построение системы управления и координации НИОКР наукоемких предприятий в условиях цифровой трансформации / Е. Д. Доброва // Менеджмент и бизнес-администрирование. – 2021. – № 3. – С. 116-125. – DOI 10.33983/2075-1826-2021-3-116-125. – EDN QWGEZM.
6. Кузнецова, Е. В. Управление портфелем проектов как инструмент реализации корпоративной стратегии : учебник для вузов / Е. В. Кузнецова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2026. — 177 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-07425-3. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: https://urait.ru/bcode/584065

УДК 004.412

Клюканов А. В., Штатнов И. А.
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия

АНАЛИЗ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТРИК ТЕСТИРОВАНИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Аннотация: в статье рассматриваются особенности применения метрик тестирования на модульном, интеграционном, системном и приёмочном уровнях. Проводится анализ их характеристик, ограничений и области применения с использованием системного анализа и визуализации данных. Особое внимание уделяется выбору эффективных метрик в зависимости от этапа тестирования. Сформулированы рекомендации по повышению качества ПО и оптимизации тестирования за счёт корректного подбора метрик.

Ключевые слова: программное обеспечение, качество программного обеспечения, тестирование программного обеспечения, уровни тестирования, метрики тестирования, тестовое покрытие, аналитика тестирования, управление качеством, автоматизация тестирования, жизненный цикл ПО, DevOps.

Введение. В условиях роста сложности программных систем особое значение приобретает системный подход к обеспечению их качества. Тестирование выступает ключевым механизмом выявления дефектов, однако его эффективность напрямую зависит от того, насколько корректно оцениваются результаты проверок. В этой связи важную роль играют метрики тестирования, позволяющие формализовать и количественно описать процессы контроля качества.

Особенностью современных процессов разработки является многоуровневая структура тестирования, включающая модульный, интеграционный, системный и приёмочный уровни. Каждый из них решает различные задачи и требует применения соответствующих методов оценки. В связи с этим возникает необходимость анализа метрик не изолированно, а в контексте конкретного уровня тестирования и его целей.

Применение метрик без учета специфики этапа разработки может привести к некорректной интерпретации результатов и, как следствие, к снижению эффективности тестирования. Поэтому актуальной задачей является определение оптимального набора метрик для каждого уровня, а также выявление их влияния на итоговое качество программного обеспечения.

Таким образом, исследование и адаптация метрик тестирования в зависимости от уровня контроля качества позволяют повысить обоснованность принимаемых решений, улучшить процессы тестирования и обеспечить более высокий уровень надежности программных продуктов.

Анализ современных публикаций. В научной литературе вопросы применения метрик тестирования программного обеспечения рассматриваются достаточно широко, при этом особое внимание уделяется их адаптации к различным уровням тестирования.

По мнению N. Fenton и J. Bieman, метрики являются одним из ключевых инструментов объективной оценки качества программного обеспечения, так как позволяют количественно описывать как процесс тестирования, так и его результаты. Авторы подчеркивают, что использование метрик должно учитывать специфику проекта и этап разработки, поскольку универсальных показателей, одинаково эффективных во всех условиях, не существует [4].

В работах J. Noyes отмечается, что аналитика тестирования выходит за рамки простого сбора метрик и включает их интерпретацию с целью выявления скрытых закономерностей. Автор указывает, что применение аналитических методов, в том числе элементов машинного обучения, позволяет прогнозировать появление дефектов и выявлять проблемные участки системы на ранних стадиях разработки [6].

Исследования F. Pecorelli, F. Palomba и A. De Lucia показывают, что между характеристиками тестирования и качеством программного продукта существует устойчивая взаимосвязь. В частности, такие показатели, как плотность дефектов и покрытие кода, могут служить индикаторами потенциальных проблем в архитектуре системы [7].

Согласно S.C. Satapathy, применение методов машинного обучения в тестировании позволяет значительно повысить точность оценки качества. Автор отмечает, что анализ больших объемов тестовых данных способствует автоматическому выявлению наиболее уязвимых компонентов программного обеспечения и оптимизации процессов тестирования [8].

В свою очередь, в стандартах IEEE подчеркивается необходимость системного подхода к документированию и оценке тестирования, включая использование метрик на всех этапах жизненного цикла программного обеспечения. Это позволяет обеспечить единый подход к контролю качества и повысить прозрачность процессов разработки [5].

Отечественные исследователи, такие как В.Ю. Рахманов и Б.Д. Тимченко, указывают на проблему избыточности метрик и необходимость их осмысленного выбора. По их мнению, чрезмерное внимание к количественным показателям без учета контекста может привести к искажению реальной картины качества программного продукта [3].

Таким образом, анализ современных публикаций показывает, что эффективное применение метрик тестирования требует комплексного подхода, включающего их адаптацию к уровню тестирования, учет особенностей проекта и использование аналитических методов для интерпретации полученных данных.

Классификация уровней тестирования по целям и масштабу. Процесс тестирования программного обеспечения представляет собой многоуровневую структуру, в рамках которой каждый уровень отличается областью охвата системы и своими целями. Такая классификация позволяет более точно организовать процесс контроля качества и выбрать соответствующие методы и метрики для оценки результатов тестирования.

В современной практике выделяют четыре основных уровня тестирования: модульный, интеграционный, системный и приёмочный. Каждый из них ориентирован на решение конкретных задач и требует применения различных подходов к оценке качества.

Модульное тестирование является начальным этапом и направлено на проверку корректности работы отдельных компонентов программы. На данном уровне основное внимание уделяется внутренней логике кода, поэтому применяются такие метрики, как покрытие кода и плотность дефектов. Это позволяет выявлять ошибки на ранних стадиях разработки и минимизировать затраты на их исправление.

Интеграционное тестирование охватывает взаимодействие между модулями системы. Его основной задачей является выявление ошибок, возникающих при обмене данными и нарушении интерфейсов. В отличие от модульного тестирования, здесь используются более комплексные сценарии и метрики, отражающие устойчивость взаимодействия компонентов и корректность интеграции.

Системное тестирование проводится на уровне всей программной системы и направлено на проверку соответствия функциональным и нефункциональным требованиям. На этом этапе оцениваются такие характеристики, как производительность, надёжность, отказоустойчивость и безопасность. Тестирование осуществляется в условиях, приближенных к реальной эксплуатации, что позволяет получить целостное представление о качестве продукта.

Приёмочное тестирование завершает процесс и ориентировано на подтверждение соответствия программного обеспечения требованиям заказчика и ожиданиям пользователей. Здесь особую роль играют показатели, связанные с пользовательским опытом, а также наличие критических дефектов, влияющих на возможность внедрения системы.

Таким образом, каждый уровень тестирования имеет собственный масштаб и цели, что напрямую влияет на выбор метрик и методов анализа. Комплексное использование различных уровней тестирования позволяет обеспечить всестороннюю оценку качества программного обеспечения и повысить эффективность процессов разработки. Классификация уровней тестирования по целям и масштабу представлена на рисунке 1.

Рис. 1. Классификация уровней тестирования по целям и масштабу

Метрики тестирования. Метрики тестирования являются важным инструментом управления качеством программного обеспечения, так как позволяют количественно оценивать результаты тестирования, отслеживать эффективность процессов и принимать обоснованные решения на различных этапах жизненного цикла ПО. Для их корректного применения необходимо учитывать цели анализа, объект оценки и уровень тестирования, на котором они используются.

Одним из распространённых подходов является классификация метрик по их назначению. В рамках данного подхода выделяют процессные, продуктовые метрики и метрики качества тестирования.

Процессные метрики характеризуют сам процесс тестирования и позволяют оценить его эффективность и управляемость. К ним относятся показатели, отражающие динамику выполнения тестов, скорость обнаружения и исправления дефектов, а также уровень автоматизации. Как отмечают Рахманов и Тимченко, такие метрики позволяют контролировать ход тестирования и своевременно выявлять отклонения от запланированных показателей [3].

Продуктовые метрики ориентированы на оценку характеристик программного обеспечения. Они позволяют определить уровень надёжности и стабильности системы за счёт анализа таких показателей, как покрытие кода, количество дефектов и их распределение по компонентам. По мнению Fenton и Bieman, именно продуктовые метрики дают возможность объективно оценить качество программного продукта и выявить проблемные области системы [4].

Метрики качества тестирования направлены на оценку полноты и эффективности тестового покрытия. Они включают показатели, связанные с качеством тест-кейсов, их соответствием требованиям, а также возможностью повторного использования. Как подчёркивают Барвин и Попов, при

автоматизированном тестировании особенно важно учитывать не только количество тестов, но и их результативность [1].

В более детализированном подходе метрики могут дополнительно разделяться на группы, связанные с проектированием тестов, их выполнением, обнаружением дефектов и оценкой рисков. Такая детализация позволяет адаптировать систему метрик под конкретные условия проекта и повысить точность анализа качества [2].

Также важно учитывать, что выбор метрик тесно связан с уровнем тестирования. На модульном уровне чаще применяются показатели, отражающие внутреннюю структуру кода, например покрытие и плотность дефектов. По мере перехода к более высоким уровням — системному и приёмочному — возрастает значимость метрик, связанных со стабильностью системы, производительностью и пользовательским опытом. Как отмечается в стандартах IEEE, использование метрик на всех этапах жизненного цикла обеспечивает целостный подход к управлению качеством [5].

Таким образом, классификация метрик тестирования позволяет систематизировать процесс оценки качества и повысить его прозрачность. Грамотный подбор и интерпретация метрик обеспечивают более точное понимание состояния проекта и создают основу для повышения эффективности как тестирования, так и разработки программного обеспечения в целом. Сравнительная диаграмма метрик тестирования по критериям представлена на рисунке 2.

Рис. 2. Сравнение метрик тестирования по критериям

Инструменты для сбора и анализа метрик тестирования. Эффективное использование метрик тестирования невозможно без применения специализированных инструментов, обеспечивающих автоматизированный сбор, обработку и визуализацию данных. Такие средства

позволяют не только фиксировать количественные показатели, но и проводить их последующий анализ, что существенно повышает прозрачность и управляемость процессов тестирования.

Одним из наиболее распространённых классов инструментов являются системы анализа покрытия кода, такие как JaCoCo, Cobertura и Coverage.py. Они позволяют автоматически определять степень охвата исходного кода тестами и выявлять участки, не подвергшиеся проверке. По мнению Куликова, использование подобных инструментов особенно эффективно на ранних этапах разработки, поскольку позволяет своевременно обнаруживать недостатки тестового покрытия и повышать надёжность программных модулей. Для анализа дефектов и управления их жизненным циклом широко применяются системы отслеживания ошибок, такие как JIRA, Bugzilla и Redmine. Эти инструменты позволяют накапливать статистику по количеству дефектов, времени их устранения и частоте повторного возникновения. Как отмечают Рахманов и Тимченко, автоматизация сбора подобных данных способствует более точному выявлению проблемных областей системы и повышает эффективность планирования тестирования.

Значительную роль играют системы непрерывной интеграции и доставки, такие как Jenkins и GitLab CI/CD. Они обеспечивают автоматический запуск тестов при каждом изменении кода, а также сбор информации о результатах выполнения тестов, времени сборки и стабильности системы. Это позволяет оперативно получать актуальные метрики и использовать их для анализа эффективности процессов разработки.

Дополнительно применяются платформы визуальной аналитики, включая SonarQube, Allure и ReportPortal, которые предоставляют удобные инструменты для представления данных в виде графиков, диаграмм и дашбордов. По мнению исследователей, визуализация метрик играет важную роль в интерпретации результатов тестирования, так как позволяет выявлять тенденции и принимать более обоснованные управленческие решения [7].

Таким образом, современные инструменты сбора и анализа метрик являются неотъемлемой частью процессов обеспечения качества программного обеспечения. Их использование позволяет интегрировать контроль качества в ежедневную практику разработки и формировать более зрелые и управляемые процессы тестирования.

Заключение. Проведённый анализ показал, что обеспечение качества программного обеспечения представляет собой комплексный и многоуровневый процесс, в рамках которого ключевую роль играют метрики тестирования. Их использование позволяет перейти от субъективной оценки качества к объективному, основанному на данных подходу, что особенно важно в условиях роста сложности программных систем и ускорения процессов разработки.

На различных уровнях тестирования — от модульного до приёмочного — метрики выполняют разные функции, однако в совокупности они

формируют целостную систему оценки качества. Применение корректно подобранных показателей позволяет не только выявлять дефекты, но и анализировать причины их возникновения, оценивать стабильность системы и прогнозировать возможные риски.

Особое значение приобретает интеграция метрик в процессы разработки, включая практики непрерывной интеграции и DevOps. В этом контексте метрики становятся не просто инструментом контроля, а основой для принятия управленческих решений, направленных на повышение эффективности разработки и сокращение времени вывода продукта на рынок. Использование современных инструментов аналитики и визуализации данных способствует формированию прозрачной среды, в которой все участники процесса могут оперативно оценивать текущее состояние проекта.

Вместе с тем, важным аспектом остаётся необходимость осмысленного применения метрик. Чрезмерная ориентация на количественные показатели без учета контекста может привести к искажению реальной картины качества. Поэтому эффективный подход предполагает сочетание количественного анализа с качественной оценкой, включая экспертное мнение и обратную связь пользователей.

Перспективы развития данной области связаны с дальнейшей интеграцией методов машинного обучения и анализа больших данных в процессы тестирования. Это позволит автоматизировать выявление закономерностей, повысить точность прогнозирования дефектов и перейти к более проактивной модели обеспечения качества. В частности, развитие подходов, ориентированных на раннее обнаружение проблем (Shift-Left Testing), будет способствовать снижению затрат на исправление ошибок и повышению надёжности программных продуктов.

Таким образом, системное и осознанное применение метрик на всех уровнях тестирования формирует основу для построения эффективных процессов обеспечения качества и способствует развитию культуры принятия решений на основе данных, что является одним из ключевых факторов успеха современных программных проектов.

Список литературы:

1. Барвин С.К., Попов Д.В. Метрики автоматизированного тестирования web-приложений // Современные научные исследования и инновации. – 2019. – № 4. – С. 4–4.
2. Горщар Р.С., Таран В.Н. Алгоритмические подходы для средств аналитики результатов тестирования систем дистанционного обучения // Системы компьютерной математики и их приложения. – 2019. – № 20-2. – С. 180–185.
3. Рахманов В. Ю., Тимченко Б. Д. Метрики в современном тестировании // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2003. – № 10. – С. 108–111.
4. Fenton N., Bieman J. Software metrics: a rigorous and practical approach. – 3rd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 637 p.
5. IEEE Computer Society. IEEE standard for software and system test documentation. – New York: IEEE, 2008. – 150 p.

6. Noyes J. Analytics in software testing: a comprehensive approach // Cochrane handbook for systematic reviews of interventions. – Hoboken: Wiley, 2019. – P. 525–545.
7. Pecorelli F., Palomba F., De Lucia A. The relation of test-related factors to software quality: a case study on Apache systems // Empirical Software Engineering. – 2021. – Vol. 26. – P. 1–42.
8. Satapathy S. C., et al. Usage of machine learning in software testing // Automated software engineering: a deep learning-based approach. – Cham: Springer, 2020. – P. 39–54.

УДК 72:004.92

Павлов А. А.
Научный руководитель: Ильвицкая С. В., д.арх., профессор
Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

ВИДЕОГЕНЕРАЦИЯ В АРХИТЕКТУРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ: ПАТТЕРНЫ ОСВОЕНИЯ И ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

Аннотация. Статья посвящена анализу внедрения инструментов видеогенерации на основе искусственного интеллекта в архитектурную практику. Эмпирическую основу исследования составили результаты интервью и последующей аналитической выборки, представленные в сводном файле итогов интервью. В проанализированном блоке видеогенерации зафиксировано 16 релевантных ответов пользователей, использующих video AI в профессиональном контексте. Наиболее востребованными платформами оказались Runway — 11 ответов (68,8%), Kling — 8 ответов (50,0%), Veo — 7 ответов (43,8%) и Krea — 6 ответов (37,5%). Полученные данные показывают, что видеогенерация занимает в архитектурной среде нишу инструмента визуальной коммуникации и презентации, а не точного проектного моделирования.

Ключевые слова: видеогенерация, архитектурная визуализация, генеративный искусственный интеллект, Runway, Kling, Veo, архитектурная практика.

Введение

Развитие генеративного искусственного интеллекта существенно трансформировало сферу архитектурной визуализации. Если первоначально основное внимание было сосредоточено на генерации текстов и статических изображений, то в последние годы заметный интерес профессионального сообщества сместился в сторону видеоинструментов. Генерация видео по тексту и анимация статических изображений позволяют архитекторам и визуализаторам демонстрировать пространство как последовательность сцен, а не как единичный кадр [2].

Технологии text-to-video и image-to-video особенно важны для архитектурной презентации, поскольку они позволяют моделировать восприятие объекта во времени: проходы по пространству, движение камеры, смену света и атмосферные эффекты. Современные обзоры архитектурной визуализации указывают, что в 2025 году динамическая подача проекта становится всё более значимым преимуществом при коммуникации с заказчиком и аудиторией [1].

Архитектурная визуализация традиционно опиралась на статичные изображения, анимационные пролёты, выполненные в специализированных пакетах, и интерактивные модели, создаваемые в игровых движках. Однако видеогенерация на основе ИИ формирует иной подход к производству визуального контента. В этом случае архитектор или визуализатор не обязательно создаёт полноценную сцену анимации вручную, а использует

комбинацию текстового запроса, исходного изображения, масок, референсов и коротких видеозаготовок. Такой способ работы сокращает цикл подготовки демонстрационных материалов и повышает вариативность подачи проекта [2].

Важно подчеркнуть, что в архитектурной среде видео выполняет не только функцию эффектной презентации. Оно становится средством проверки коммуникативной убедительности проекта: насколько читается масштаб, ощущается пространственная глубина, раскрывается сценарий движения пользователя, воспринимается освещение и атмосфера среды. Именно поэтому видеогенерация сегодня интересна не только специалистам по archviz, но и архитекторам-концептуалистам, дизайнерам интерьеров и участникам команд, отвечающим за публичную презентацию проектных решений [1].

Целью настоящей статьи является анализ паттернов использования видеогенерации в архитектурной практике на основе результатов интервью, обобщённых в итоговом аналитическом файле. В задачи исследования входят: определение наиболее востребованных платформ; выявление стадий и задач использования; анализ временной динамики внедрения; фиксация основных ограничений технологии.

Материалы и методы

Источником эмпирических данных выступил файл итогов интервью, содержащий структурированные результаты опросно-интервьюционного материала по использованию нейроинструментов в архитектуре. В блоке видеогенерации зафиксировано 16 ответов респондентов, относящихся к профессиональному использованию видео-ИИ. В аналитической таблице представлены данные по перечню платформ, времени начала использования, частоте применения и отдельным характеристикам практического освоения.

Согласно итогам интервью, в список платформ видеогенерации вошли Runway, Kling, Pika Labs, Luma Dream Machine, Wan, Hailuo, Synthesia, Adobe Firefly Video, OpenAI Sora, Kaiber, Stable Video Diffusion, Veo, Seedance и Krea. Для интерпретации результатов использовался описательный анализ, а также сопоставление с открытыми источниками по text-to-video и архитектурной визуализации [2].

Методологически исследование строится на сочетании количественного и качественного подходов. Количественный аспект связан с анализом распределения ответов по платформам, годам начала использования и характеру применения инструмента. Качественный аспект выражается в интерпретации профессиональных сценариев использования видеогенерации и ограничений, зафиксированных в интервью. Такой комбинированный подход позволяет не только описать частоты, но и выявить более глубокую логику интеграции video AI в архитектурную практику.

Следует учитывать, что речь идёт не о массовом социологическом исследовании всей архитектурной отрасли, а о целевой профессиональной выборке, отражающей мнения наиболее вовлечённых в цифровую среду

участников. Это накладывает ограничения на возможность прямой экстраполяции результатов на всю професию, но одновременно повышает ценность интервью как инструмента выявления ранних паттернов технологического освоения. Для исследований новых цифровых инструментов именно такие ранние данные зачастую оказываются особенно показательными.

Результаты исследования

Анализ итогов интервью показывает, что видеогенерация уже используется частью профессионального архитектурного сообщества, однако объём этой группы пока остаётся ограниченным. Из 55 участников интервью релевантный блок по видеогенерации сформировал подвыборку в 16 пользователей. Это указывает на то, что video AI пока не является массовым инструментом среди всех архитекторов и дизайнеров, но уже формирует отдельную практику внутри профессиональной среды [6].

Среди платформ видеогенерации лидирующую позицию занимает Runway — 11 ответов, или 68,8% пользователей подвыборки. Второе место занимает Kling — 8 ответов (50,0%), третье — Veo с 7 ответами (43,8%). Далее следуют Krea — 6 ответов (37,5%), Wan — 5 ответов (31,3%), Kaiber — 4 ответа (25,0%), Luma Dream Machine — 3 ответа (18,8%), Pika Labs — 1 ответ (6,3%), Seedance — 1 ответ (6,3%) и отдельные единичные упоминания других решений. OpenAI Sora и Adobe Firefly Video в данной выборке не получили зафиксированных ответов.

Полученное распределение показывает, что профессиональное сообщество предпочитает не абстрактный набор видеонейросетей, а вполне определённый круг платформ, обладающих понятным пользовательским сценарием и пригодностью для визуального сторителлинга. Лидерство Runway выглядит закономерным: этот инструмент давно присутствует в поле креативных индустрий и воспринимается как один из самых зрелых сервисов video AI [5].

С практической точки зрения это распределение свидетельствует о том, что архитектурное сообщество выбирает платформы не только по критерию технологической новизны, но и по удобству интеграции в существующий рабочий процесс. Инструменты получают распространение тогда, когда они позволяют быстро перейти от идеи к убедительному результату без необходимости глубокой технической настройки. Для архитекторов и визуализаторов, работающих в условиях высокой нагрузки и жёстких сроков, именно простота входа и предсказуемость результата становятся критически важными параметрами выбора.

Отдельный интерес представляет частота использования видеогенерации. В аналитическом блоке файла зафиксировано распределение, показывающее, что заметная часть пользователей обращается к video AI нерегулярно, по мере необходимости конкретной презентационной задачи. Это косвенно подтверждает, что видеогенерация пока встроена в

архитектурный workflow не как постоянный ежедневный инструмент, а как вспомогательный модуль для усиления визуальной подачи проекта.

Такая модель использования позволяет предположить, что на современном этапе video AI воспринимается, прежде всего, как инструмент усиления готового материала. Пользователь прибегает к нему в тех случаях, когда необходимо повысить выразительность уже созданного рендера, подготовить короткий ролик к защите, конкурсу или встрече с заказчиком. Следовательно, видеогенерация пока не вытесняет традиционные способы создания архитектурной анимации, а занимает промежуточную позицию между статичным archviz и полноценным продакшеном.

Важной характеристикой является и временная динамика освоения технологии. По данным файла итогов интервью, начало использования видеогенерации распределилось следующим образом: 18,8% респондентов начали применять её в 2025 году, 31,3% — в 2024 году, 50,0% — в 2023 году, при отсутствии зафиксированных ответов по 2022 году. Это указывает на то, что основное ядро пользователей video AI сформировалось в 2023–2025 гг., то есть в фазе активного роста качества подобных систем и повышения их доступности.

Эта динамика важна не только как статистический показатель, но и как индикатор изменения профессиональной культуры. Архитектурная среда обычно осторожно относится к инструментам, которые влияют на точность, репрезентативность и производственный цикл. Поэтому быстрое появление пользователей video AI в 2023–2025 гг. свидетельствует о достаточно высоком доверии к инструменту в его презентационном сегменте. По сути, профессионалы начинают воспринимать нейровидео не как экзотику, а как рабочую опцию, применимую в реальных проектах.

Наряду с количественными данными, текстовые ответы интервью позволяют выделить несколько устойчивых сценариев применения видеогенерации в архитектурной среде. Во-первых, video AI используется для оживления статических архитектурных рендеров. Во-вторых, он служит инструментом подготовки коротких концептуальных роликов и презентаций для заказчика. В-третьих, видеогенерация применяется как способ быстрого тестирования атмосферы и визуального настроения проекта без затрат на полноценную 3D-анимацию.

Отдельно следует отметить коммуникативную роль видеогенерации в архитектурной практике. Архитектору всё чаще требуется не только разработать проектное решение, но и убедительно его представить. В этой логике video AI становится инструментом упаковки идеи: он помогает показать движение по пространству, смену точек зрения, характер среды и эмоциональный тон проекта. Для заказчика или внешней аудитории такая подача может быть более понятной, чем одиночный статичный рендер, особенно на ранних стадиях обсуждения.

Сдерживающие факторы также отчётливо видны в интервью. Респонденты упоминают проблемы точности, нестабильности кадров, ограниченного контроля над геометрией и сложности использования результатов video AI в задачах, где требуется проектная достоверность. Это означает, что видеогенерация пока выполняет преимущественно презентационную функцию и не может заменить традиционные инструменты трёхмерного моделирования, анимации и BIM-координации [2].

Кроме того, ограничением выступает и профессиональная ответственность архитектора за точность визуальной репрезентации. Если видео создаёт ошибочное представление о пропорциях, материалах или пространственной логике, это может привести к искажению проектного замысла в глазах заказчика. Поэтому использование видеогенерации требует не только технического освоения инструмента, но и формирования критической профессиональной позиции по отношению к результату. Иными словами, video AI в архитектуре не может применяться без экспертной верификации человеком.

Обсуждение

Результаты интервью позволяют рассматривать видеогенерацию как быстро развивающийся, но пока нишевой сегмент архитектурной цифровой практики. С одной стороны, наличие устойчивых лидеров — Runway, Kling и Veo — говорит о сформировавшемся ядре востребованных платформ. С другой стороны, малый размер активной подвыборки показывает, что технология ещё не стала стандартом профессии и продолжает осваиваться прежде всего наиболее цифрово ориентированными участниками рынка [6].

Показательно, что video AI востребован прежде всего там, где архитектору необходимо усилить эмоциональную и пространственную выразительность проекта. Видео позволяет показать не только объект, но и режим его восприятия: движение через пространство, масштаб, световую динамику и атмосферу. Поэтому даже ограниченное проникновение таких инструментов может существенно влиять на способы архитектурной коммуникации [1].

Вместе с тем данные интервью подтверждают, что на текущем этапе видеогенерация не является средством точной архитектурной разработки. Её главное достоинство — ускорение создания выразительного видеоконтента, а главное ограничение — недостаточный контроль над архитектурной точностью. Следовательно, на современном этапе наиболее адекватной моделью интеграции является гибридный workflow, при котором video AI используется поверх уже сформированной визуальной базы проекта [4].

В более широком контексте видеогенерация отражает переход архитектурной профессии от логики исключительно проектного производства к логике мультимодальной коммуникации. Сегодня архитектор работает не только с чертежом, моделью и спецификацией, но и с медиасредой, в которой проект существует как визуальный нарратив. Именно в этой среде video AI

становится значимым инструментом: он позволяет быстрее производить контент, способный конкурировать за внимание в цифровом пространстве и одновременно решать прикладные профессиональные задачи представления идеи.

Можно предположить, что дальнейшее развитие видеогенерации в архитектуре будет идти по двум направлениям. Первое направление связано с повышением точности и управляемости моделей, что приблизит их к более серьёзным профессиональным задачам. Второе направление связано с интеграцией video AI в существующие экосистемы визуализации, когда нейровидео станет не отдельным экспериментом, а стандартным этапом подготовки презентационных материалов. Уже сейчас интервью показывают наличие предпосылок для обоих направлений, хотя до полной институционализации технологии ещё далеко.

Заключение

Проведённый анализ итогов интервью показал, что видеогенерация постепенно закрепляется в современной архитектурной визуализации как инструмент презентации, концептуального сторителлинга и оживления статических рендеров. В подвыборке из 16 пользователей video AI лидирующие позиции заняли Runway (68,8%), Kling (50,0%), Veo (43,8%) и Krea (37,5%). Основной этап освоения технологии пришёлся на 2023–2025 гг., что подтверждает её включённость в новейшую волну цифровой трансформации профессиональной среды.

В то же время видеогенерация пока ограничена проблемами управляемости, точности и воспроизводимости результата, поэтому в архитектуре она выполняет преимущественно коммуникативную, а не проектно-моделирующую функцию. Перспективы дальнейшего исследования связаны с более детальным сопоставлением профессиональных специализаций пользователей, анализом качества video output в сравнении с традиционной анимацией и разработкой методик включения video AI в архитектурный workflow [2].

Практическая значимость исследования состоит в том, что оно фиксирует раннюю стадию формирования новой профессиональной практики внутри архитектурной визуализации. Наблюдаемые в интервью паттерны дают основание утверждать, что video AI уже перестал быть исключительно экспериментальной новинкой и превращается в рабочий инструмент ограниченного, но реального применения. Для образовательных программ, архитектурных студий и исследовательских центров это означает необходимость более системного внимания к видеогенерации как к новой области компетенций.

Список литературы:

1. Архитектурная визуализация с помощью нейросетей // CyberLeninka. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/arhitekturnaya-vizualizatsiya-s-pomoschyu-neyrosetey (дата обращения: 17.04.2026).

2. Основные принципы генерации text-to-video — как нейросети создают видео // СберУниверситет. URL: https://courses.sberuniversity.ru/video_generation/21 (дата обращения: 17.04.2026).

3. Архитектурная визуализация: что в моде в 2025 и что устарело // Meta Education. URL: http://metaeducation.ru/blog/arhitekturnaya_vizualizaciya (дата обращения: 17.04.2026).

4. Генерация видео: обзор интересных подходов // Habr. URL: https://habr.com/ru/articles/912522/ (дата обращения: 17.04.2026).

5. AI Video Generators in 2025: The Complete Guide to Next-Gen Video Creation // GarageFarm. URL: https://garagefarm.net/blog/the-complete-guide-to-ai-video-generators (дата обращения: 17.04.2026).

УДК 004.056:003.26+004.056.5

Гильмутдинов А. И.
Научный руководитель: Аюпова А. Р., к.ф.-м.н.
Уфимский университет науки и технологий, Нефтекамский филиал, Нефтекамск, Россия

МЕХАНИЗМЫ ЗАЩИТЫ ОТ SIDE-CHANNEL АТАК НА КРИПТОГРАФИЧЕСКИЕ БИБЛИОТЕКИ В ОБЛАЧНЫХ ФУНКЦИЯХ (SERVERLESS)

Аннотация. В настоящей работе рассматриваются механизмы защиты криптографических библиотек от атак по побочным каналам в среде бессерверных облачных вычислений (Function-as-a-Service). Анализируются основные векторы утечки информации, включая временные вариации исполнения операций и микроархитектурные эффекты, связанные с разделяемой кэш-памятью. Предлагается комплексный подход к противодействию данным угрозам, объединяющий программно-алгоритмические методы с аппаратно-виртуализационной изоляцией на базе доверенной среды исполнения. Отдельное внимание уделяется требованиям нормативно-правовых актов Российской Федерации, регламентирующих сертификацию средств криптографической защиты информации в мультитенантных облачных средах.

Ключевые слова: побочные каналы, бессерверные вычисления, криптографические библиотеки, константно-временной код, микроархитектурные атаки, маскирование данных, нормативно-правовое регулирование.

Эволюция облачных парадигм привела к доминированию бессерверных моделей, в которых исполнение прикладных функций происходит в кратковременных контейнерных средах без непосредственного управления операционной системой со стороны разработчика. Криптографические библиотеки, реализующие алгоритмы шифрования, электронной подписи и протоколов согласования ключей, в таких условиях становятся критическими компонентами, уязвимыми для атак по побочным каналам. Специфика среды FaaS заключается в мультитенантном характере: на одном физическом узле последовательно или параллельно размещаются экземпляры функций, принадлежащих различным субъектам доступа. Данная особенность создает предпосылки для реализации так называемых атак повторного использования ресурсов (reuse attacks), при которых злоумышленник, имеющий возможность выполнять легитимную функцию на том же оборудовании, восстанавливает секретные параметры криптографических операций другой функции.

Нормативно-правовая база Российской Федерации, включая требования к средствам криптографической защиты информации (СКЗИ) классов КС1, КС2 и КС3, предписывает обязательное противодействие атакам по побочным электромагнитным излучениям и наводкам (ПЭМИН). Целью настоящей работы является анализ существующих угроз и синтез архитектурных

принципов построения защищенных криптографических библиотек для бессерверных сред.

Побочный канал в контексте облачных функций представляет собой любой физический или микроархитектурный эффект, корреляция которого с обрабатываемыми секретными данными может быть обнаружена и использована атакующим. Для бессерверных сред наиболее значимыми признаются три категории [1].

Первая категория включает временные атаки (timing attacks). Криптографические библиотеки часто содержат условные ветвления, зависящие от значения ключевых байтов, либо оптимизированные табличные реализации, время выполнения которых варьируется. В среде FaaS злоумышленник может запустить функцию-нарушитель с высоким приоритетом и, используя точные средства измерения времени (например, счетчик тактов процессора), зафиксировать длительность выполнения криптографической операции функции-жертвы. Примечательно, что виртуализация и контейнеризация не вносят достаточного шума для нивелирования утечек, поскольку современные гипервизоры второго типа допускают детерминированное планирование.

Вторая категория — микроархитектурные атаки, опирающиеся на разделяемые кэш-структуры. Процессоры архитектуры x86-64 и ARMv8-A содержат многоуровневые кэши, доступ к которым не изолируется между контейнерами на одном ядре. Атака типа Prime+Probe или Flush+Reload позволяет атакующему определить, к каким областям памяти обращалась функция-жертва, и, следовательно, восстановить индексы таблиц подстановок (S-боксов), что для алгоритмов типа AES раскрывает раундовые ключи. Бессерверная модель усугубляет проблему тем, что время жизни функций исчисляется секундами, однако повторное развертывание атакующей функции на том же физическом узле достигается методами пространственной коллокации, основанными на анализе идентификаторов узлов или ответов на сетевые зонды.

Как верно отмечают Лаврентьева Т. А., Матвеев С. В., третья категория — атаки по потребляемой мощности, которые в классическом понимании требуют физического доступа к измерительному оборудованию. Однако в облачных средах доказана возможность мониторинга мощности через интерфейсы управления питанием (RAPL, Running Average Power Limit). Современные процессоры Intel и AMD предоставляют программно-читаемые счетчики потребляемой энергии. Злоумышленник, имеющий доступ к чтению регистров модели RAPL в гостевой операционной системе (что разрешено в некоторых конфигурациях виртуализации без привилегий), может выполнять синхронизированные измерения мощности во время работы функции-жертвы. Хотя частотный диапазон таких измерений ограничен, статистические методы (в том числе разностный анализ мощности) позволяют выделить полезный сигнал [2].

Ключевая проблема защиты от побочных каналов в бессерверной среде состоит в том, что стандартные организационные меры (контролируемая зона, изолированное помещение) не применимы. Облачный провайдер может быть как добросовестным, так и недобросовестным, а в модели FaaS сам провайдер не предоставляет гарантий физической изоляции экземпляров функций. Более того, требования Федерального закона «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» (149-ФЗ) и приказа ФСБ России № 796 предписывают для государственных информационных систем использование только сертифицированных СКЗИ. Сертификация таких средств в облаке возможна лишь при условии, что среда исполнения соответствует классу защищенности не ниже первого (ОС1 или ОС2 по классификации руководящих документов Гостехкомиссии России). Однако бессерверная архитектура по умолчанию не предоставляет средств для изоляции на уровне кэшей и шин памяти. Дополнительной проблемой является кратковременность существования экземпляра функции. Криптографическая библиотека должна выполнять инициализацию, генерацию и использование ключей в течение одного вызова, после чего состояние уничтожается. Однако современные исследования показывают, что остаточная информация в кэш-памяти и буферах переупорядочивания команд может сохраняться между вызовами разных функций, если планировщик повторно использует тот же виртуальный процессор.

В условиях отсутствия возможности физического экранирования основным направлением противодействия побочным каналам является модификация алгоритмической логики криптографических библиотек. Наиболее распространенным требованием к таким библиотекам для бессерверных сред является реализация константно-временного исполнения (constant-time execution). Данный принцип подразумевает, что время выполнения криптографической операции не должно зависеть ни от одного бита секретного ключа или промежуточного состояния. Достигается это путем устранения условных переходов по секретным данным и замены табличных обращений с зависимостью от ключа на последовательности арифметико-логических операций [3].

Вторым важным методом является рандомизация (blinding) промежуточных данных. Идея заключается во внесении в вычисления случайного маскирующего значения, которое преобразует все зависимые от ключа величины, но после завершения операции устраняется. Для алгоритма RSA используется маскирование модуля или показателя степени случайным числом, что делает невозможным корреляционный анализ временных вариаций или мощности, поскольку атакующий не знает вносимую случайность. В бессерверной среде генерация таких масок должна производиться из криптографически стойкого генератора случайных чисел, аттестованного в соответствии с требованиями Р 1323565.1.026-2019. При этом важно обеспечить, чтобы сам генератор не являлся источником

побочного канала, что достигается аппаратной поддержкой инструкций типа RDRAND в сочетании с программным постобработчиком на основе ГОСТ Р 34.11-2012 (функция хеширования Стрибог).

Третья контрмера — применение защищенных таблиц подстановок, использующих технику предварительного маскирования и случайной перестановки адресов. Вместо того чтобы обращаться к стандартной таблице S-боксов, библиотека при инициализации создает несколько копий таблицы, каждая из которых преобразована случайной перестановкой и маскирующим значением. Обращение к такой таблице по индексу, зависимому от секрета, не приводит к детерминированной утечке в кэш, поскольку злоумышленник не может предсказать, какой физический адрес кэш-линии соответствует данному логическому индексу. Однако следует учитывать, что данный метод увеличивает время инициализации, что критично для «холодного старта» облачной функции. Компромисс достигается кэшированием таких предвычисленных таблиц в защищенной памяти с ограничением времени жизни [4].

Программные методы не устраняют микроархитектурные утечки, включая конфликты в буферах трансляции адресов. Поэтому в бессерверных средах применяются доверенные среды исполнения, что в российской практике соответствует понятию «доверенный аппаратный модуль», изолирующему криптографические операции на уровне ядра. Доверенная среда выделяет защищённый анклав, недоступный гипервизору и соседним функциям. Для отечественных платформ на базе процессоров «Эльбрус» и «Байкал-Т1» требуются аналогичные решения с сертификацией гипервизора не ниже третьего класса защищённости.

Пассивная защита недостаточна, поэтому платформы внедряют активное детектирование атак на основе мониторинга процессорных счётчиков производительности. При выявлении паттерна, характерного для атаки Prime+Probe, планировщик может переместить функцию-жертву на другое ядро или выделить эксклюзивные кэш-ресурсы. Согласно приказу ФСТЭК России № 21, система обнаружения обязана фиксировать превышение порогов промахов кэша и вариативности времени доступа к памяти. Для криптографических библиотек в бессерверной среде требуется константно-временное исполнение всех операций с секретными ключами без условных переходов и табличных обращений по секретному индексу. Библиотека обязана включать механизмы маскирования для асимметричных алгоритмов и блочных шифров в уязвимых режимах [5].

Таким образом, обеспечение криптографической безопасности в бессерверных облачных вычислениях требует перехода от классических физических методов экранирования к комбинированной защите, объединяющей программно-алгоритмические контрмеры, аппаратную изоляцию и активный мониторинг. Константно-временное исполнение и маскирование криптографических операций устраняют детерминированные

временные и кэш-зависимые утечки, тогда как доверенная среда исполнения обеспечивает изоляцию ключевой информации от гипервизора и соседних функций, что соответствует требованиям постановления Правительства РФ № 313 и приказа ФСТЭК России № 21. Внедрение систем обнаружения аномалий на базе процессорных счетчиков производительности позволяет блокировать попытки проведения побочных атак до реализации угрозы.

Список литературы:

1. Яковишин А.Д. ПРИМЕНЕНИЕ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В ОБЛАЧНЫХ СЕРВИСАХ // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. №1-2 (88). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-kriptograficheskih-tehnologiy-dlya-zaschity-informatsii-v-oblachnyh-servisah (дата обращения: 17.03.2026). DOI: 10.24412/2500-1000-2024-1-2-245-249 EDN: NZMRJZ

2. Лаврентьева Т.А., Матвеев С.В. Защита от атак по побочным каналам на основе декомпозиции таблиц замен для алгоритма «Кузнечик» // Математические вопросы криптографии. — 2021. — Т. 12, № 2. — С. 147–157.

3. Мостовой Р.А., Левина А.Б., Негодаев К.С. Автоматизированный анализ уязвимостей криптосистем к атакам по сторонним каналам: генерализация подхода и формализация задачи // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2019. — № 8. — С. 46–52.

4. Новиков В.К., Краснов М.Г., Рекунков И.С. Средства, технологии, системы и технические каналы утечки информации для осуществления киберслежки за человеком и его деятельностью: монография. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2022. — 160 с.

5. Родин В.Н., Локнов А.И., Саратов Д.Н. Способы и средства технической защиты конфиденциальной информации от утечки по техническим каналам: учебное пособие / под общ. ред. Ю.И. Синещука. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет МВД России, 2023. — 184 с.

УДК 004.89:69

Яналиева К. А.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОВЕРОК ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ. РАБОТА С БОЛЬШИМ МАССИВОМ ДАННЫХ.

Аннотация: с ростом использования цифровых информационных моделей (ЦИМ/BIM) в строительной и инженерной отраслях, возрастают требования к точности и эффективности обработки данных для обеспечения соответствия проектной документации нормативным требованиям. В данной статье рассматривается подход к автоматизации процесса разбора и формирования условий проверок на основе табличных данных, что позволяет ускорить анализ и повысить надежность результатов. В качестве примера используется обработка таблицы из ГОСТа 32569 для проверки минимальных расстояний между трубопроводами. Представлена методология создания шаблонов требований, основанная на искусственном интеллекте и семантическом анализе, что позволяет извлекать все возможные варианты проверок и генерировать более 20 000 условий для различных групп объектов. Эти условия затем загружаются в BIM-агрегатор для автоматической верификации и проверки соответствия проектных решений нормативам. Предложенный подход улучшает процессы проектирования и проверки, повышая качество, точность и скорость разработки проектной документации.

Ключевые слова: Цифровая информационная модель (ЦИМ), семантический анализ, BIM-агрегатор.

С ростом использования цифровых информационных моделей (CIM/BIM) в строительной и инженерной отраслях возрастают требования к точности и эффективности обработки данных [1]. Одной из ключевых задач становится автоматизация разбора большого массива данных требований и составление условий проверок, для соблюдения нормативной документации, что необходимо для обеспечения высокого уровня качества и соответствия проектной документации. Нормативно-техническая документация в строительстве насчитывает тысячи страниц, и ручной поиск релевантных требований для конкретного проектного решения занимает значительное время. Автоматизация этого процесса позволяет не только ускорить проверку, но и исключить человеческий фактор при интерпретации нормативных положений. В данной статье рассматриваются подходы к автоматизации как условий в текстовом виде, так и табличном, для последующего применения размеченного требования в BIM-агрегаторе. Основное внимание уделяется разработке инструментов, позволяющих автоматизировать проверку информации, ускорить процессы анализа данных и повысить надежность результатов. Актуальность такого подхода обусловлена общим трендом на цифровую трансформацию

строительной отрасли, где все большее значение приобретают методы машинного обучения и семантической обработки данных [5].

Внедрение BIM-технологий приводит к экспоненциальному росту объема обрабатываемых данных, что делает традиционные методы ручной проверки проектной документации не только трудоемкими, но и потенциально ошибочными. Особую сложность представляют случаи, когда нормативные требования содержатся в неструктурированном или слабоструктурированном виде, например, в таблицах с множеством зависимых параметров.

Первым этапом, для проведения проверки ЦИМ, является отбор необходимых требований, которые используются для проверки то или иной модели. Отбор происходит при помощи одного из модулей цифровой платформы NSR Specification Модуль требований, базы машиночитаемых и машинопонимаемых требований [3]. Далее происходит семантический анализ, для создания условий проверки. Анализ требований также проводится на платформе NSR Specification Модуль семантического анализа. Как отмечают исследователи в области обработки строительных норм, именно этап семантического анализа является наиболее критичным для обеспечения корректной последующей верификации [6]. Для наглядного понимания обратимся к требованию из приложения Е ГОСТа 32569, которое содержит в своем тексте формулы, иллюстрацию и таблицу, в которой указаны нормы расстояний между деталями трубопровода в зависимости от характеристик, таких как диаметр, наличия изоляции, температуры стенок трубопровода и других [4]. Современные технологии обработка текста очень плохо работают с табличными форматами, и тем более с таблицами из стандартов. Проблема заключается в том, что таблицы в нормативных документах часто содержат сложные логические связи между ячейками, условные обозначения, примечания и ссылки на другие разделы документа. Кроме того, значения в таблицах могут зависеть от комбинаций нескольких параметров (диаметр, температура, наличие изоляции и т. д.), что требует предварительной нормализации данных перед их использованием в автоматизированных системах проверки.

10.1.9 Расстояние между осями смежных трубопроводов и от трубопроводов до строительных конструкций (рисунок 10.1) как по горизонтали, так и по вертикали следует принимать с учетом возможности сборки, ремонта, осмотра, нанесения изоляции, а также величины смещения трубопровода при температурных деформациях. В приложении Е указаны расстояния между осями смежных трубопроводов и от стенок каналов и стен зданий.

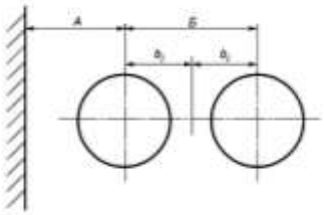


Рисунок 10.1 - Расположение трубопроводов

При наличии на трубопроводах арматуры для обогревающих спутников принятые по приложению Е расстояния *А* и *Б* (см. рисунок 10.1) следует проверять исходя из условий необходимости обеспечения расстояния в свету не менее:

- для неизолированных трубопроводов при $DN \leq 600$ - 50 мм;

- для неизолированных трубопроводов при $DN > 600$ и всех трубопроводов с тепловой изоляцией - 100 мм.

Расстояние между нижней образующей или теплоизоляционной конструкцией и полом или дном канала принимают не менее 100 мм.

Расстояние *Б* (между осями трубопроводов) определяют суммированием табличных размеров b_1, где $b_1 = b_1, b_2, \ldots b_6$ (приложение Е).

При расположении фланцев в разных плоскостях ("вразбежку") расстояние между осями неизолированных трубопроводов следует определять суммированием b_4 большего диаметра и $b_5 - b_6$ меньшего диаметра.

Таблица Е.1 - Расстояния между осями смежных трубопроводов и от трубопроводов до стенок каналов и стен зданий, мм, не менее

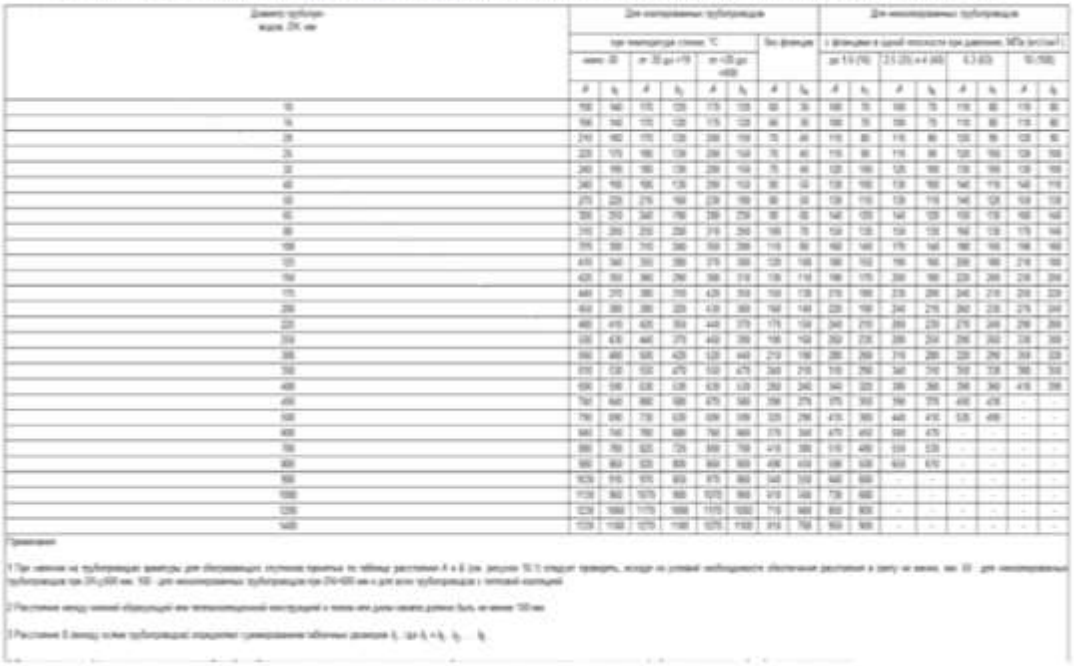


Рис.1 и Рис.2 Исходный текст требования и Таблица, прилагаемая к тексту требования.

Опираясь на таблицу требования и иллюстрацию, можно заметить, что в ней указаны не абсолютные значения расстояний, а относительные: от оси трубопровода до условной середины расстояния до другой трубы. И так как необходимо использовать данные условия для проверки минимального

расстояния между трубопроводами в BIM-агрегаторе, целесообразно будет провести расчет расстояний для всех возможных пар труб трубопровода.

Для этого сперва формируется перечень всех возможных групп деталей трубопровода и затем происходит суммирование их между собой. И именно здесь происходит применение автоматизированного способа разбора табличных условий. Важно подчеркнуть, что традиционные методы обработки текстовых нормативных документов часто оказываются неэффективными при работе с табличными данными сложной структуры [2]. Предлагаемый метод позволяет преодолеть это ограничение.

Таблица загружается на платформу, где из нее создается шаблон требования, который проходит последующую разметку по присваиванию компонентов (значений слов) и составление простых суждения (условий для отбора и проверки объектов в модели), также необходимым шагом является этап классификации, присвоение кодов, это может быть как и внутренний классификатор, так и КСИ, это необходимо для нахождения объектов в ЦИМ. Все этапы семантического анализа и классификации проходят при помощи подсказок Искусственного интеллекта, однако все равно необходим контроль специалиста. Шаблон создается при помощи составления целостного предложения из ячеек таблицы и указания некоторых из них как переменное значения, для последующей возможности замены переменных параметров, тем самым извлекая все возможные варианты. Далее шаблон применяется ко всей таблице, где в зависимости от переменных (расстояний, диаметра, толщины стенок и пр.) создается необходимый набор правил проверки, и уже сформированные и размеченные суждения используются для создания условий проверок в BIM-агрегаторе.

Данная таблица прошла автоматизированный разбор, и в общей сложности из нее получилось более 20 тысяч условий для 205 групп объектов.

Такой объем проверочных условий принципиально невозможно сформировать вручную, что доказывает необходимость применения предложенного автоматизированного подхода. Каждое сгенерированное условие представляет собой законченное логическое выражение, которое может быть самостоятельно интерпретировано BIM-агрегатором без дополнительной обработки. Это обеспечивает масштабируемость решения на любые другие типы нормативных таблиц.

После разбора условия загружаются в BIM-агрегатор, который определяет по заданным параметрам необходимые трубы и проверяет их, одну с другой, на значение минимального расстояния. Интеграция семантических правил с инструментами BIM-агрегации позволяет не только автоматизировать процесс контроля, но и существенно сократить время на проведение экспертизы проектной документации [5]. В ходе исследования реализован подход к автоматизированному извлечению и обработке информации из таблиц, используемых для составления шаблонов требований в контексте цифровых информационных моделей (ЦИМ). Система, основанная на методах

искусственного интеллекта и семантического анализа, позволила эффективно преобразовывать структурированные данные в наборы логических правил, которые затем используются для автоматической верификации объектов в BIM-агрегаторе [6].

Использование таблиц как исходного материала для генерации шаблонов и последующего формулирования суждений позволяет значительно ускорить процесс разработки требований для различных групп объектов. В результате автоматизированного разбора и формирования более 20 тысяч проверочных условий, система обеспечивает высокую точность и гибкость при верификации объектов по различным параметрам, таким как расстояния, диаметр и толщина стенок. Применение полученных суждений в BIM-агрегаторе значительно улучшает процессы проектирования и проверки, позволяя более эффективно выявлять потенциальные ошибки и несоответствия, а также гарантировать соответствие проектных решений установленным нормативам и стандартам. В перспективе данный подход может быть расширен для других типов объектов и условий, что откроет новые возможности для интеграции искусственного интеллекта в процессы проектирования и проверки в сфере строительства и инфраструктуры. Предложенный метод сочетает в себе автоматизацию, высокую точность и адаптивность, что делает его эффективным инструментом для повышения качества и скорости проектирования, а также для обеспечения более надежной эксплуатации объектов в рамках ЦИМ.

Отдельно следует отметить экономический эффект от внедрения предложенного подхода. Сокращение времени на проверку проектной документации позволяет уменьшить сроки проектирования в целом, что особенно важно для крупных инфраструктурных проектов с жесткими временными ограничениями. Кроме того, снижение количества ошибок на этапе проектирования ведет к уменьшению затрат на переделки и доработки на этапе строительства и эксплуатации. По предварительным оценкам, автоматизация проверок на основе табличных данных может сократить трудозатраты экспертов на 30–40% при повышении полноты охвата нормативных требований. Таким образом, предлагаемое решение имеет не только технологическую, но и выраженную экономическую ценность для участников инвестиционно-строительного процесса.

Список литературы:

1. Долганова О.И., Деева Е.А. Готовность компании к цифровым преобразованиям: проблемы и диагностика // Бизнес-информатика. 2019. Т. 13. № 2. С. 59–72
2. Тузов В.А. Основные направления исследований, основанные на семантическом анализе текстов [Электронный ресурс]. - URL: http://www.apmath.spbu.ru/ru/info/tuzov/onapr.html
3. Нанософт. Обучающие материалы по продукту NSR Specification. — [Электронный ресурс]. – URL: https://www.nanodev.ru/products/nsr_specification/learning/
4. Межгосударственный стандарт "ГОСТ 32569-2013 Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производствах" от 01.01.2015

5. Соловьев Р.П., Интеграция BIM и искусственного интеллекта для автоматической проверки проектных решений. Санкт-Петербург: СПбГАСУ. 2022 г.

6. Муромцев Д.И., Шилин И.А., Плюхин Д.А., Баймуратов И.Р., Хайдарова Р.Р., Дементьева Ю.Ю., Ожигин Д.А., Малышева Т.А. Построение графов знаний нормативной документации на основе семантического моделирования и автоматического извлечения терминов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 2. С. 256-266. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-256-266.

УДК 004.89

Куличков Д. В.
Научный руководитель: Филиппович А. Ю., к.т.н.
Московский политехнический университет, Москва, Россия

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ТОНАЛЬНОСТИ РУССКОЯЗЫЧНЫХ КОММЕНТАРИЕВ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ

Аннотация. В статье рассматривается задача повышения точности анализа тональности отзывов и комментариев пользователей в интернете. Предложена комбинированная методика, агрегирующая результаты восьми разнородных моделей: VADER, Flair, RuBERT, RoBERTa, DistilBERT, логистической регрессии, случайного леса и SVM. Эксперимент проведён на выборке из 1000 размеченных отзывов пользователей. Выявлены систематические расхождения между пользовательскими рейтингами и предсказаниями моделей.

Ключевые слова: анализ тональности, сентимент-анализ, ансамблевое обучение.

1. Введение

В условиях быстрого роста пользовательского контента задача автоматического определения эмоциональной окраски текста становится критически важной для бизнеса, государственных структур и научных исследований. Анализ тональности позволяет оценивать общественное мнение, выявлять слабые стороны продуктов и своевременно реагировать на негатив или критику [1,2].

Современные подходы к анализу тональности можно разделить на три основные категории: 1. методы на основе правил и словарей; 2. классические методы машинного обучения; 3. методы глубокого обучения на основе нейронных сетей и трансформеров [1, 3, 4].

В последние годы наблюдается переход от лексико-статистических методов к нейросетевым архитектурам. Среди наиболее значимых работ последнего времени следует отметить исследование Сметанина [6], который провёл систематический анализ методов сентимент-анализа для русскоязычных текстов и выделил основные вызовы: недостаток качественных размеченных корпусов, сложность обработки иронии и сарказма, а также проблему переноса моделей с английского языка. В работе Двойниковой и Карпова [4] представлен аналитический обзор подходов к распознаванию тональности русскоязычных текстовых данных, где авторы приходят к выводу о целесообразности гибридных методов, сочетающих словарные подходы и машинное обучение.

Среди зарубежных исследований особого внимания заслуживают работы Pagano и Maalej [7], в которых на основе анализа более 300 000 отзывов из App Store было выявлено J-образное распределение пользовательских оценок. Guzman и Maalej [8] предложили один из первых подходов к аспектно-ориентированному сентимент-анализу отзывов на мобильные приложения. Chen

и соавторы [9] разработали систему AR-Miner для автоматического извлечения информативных отзывов. Maalej с коллегами [10] провели масштабное исследование по автоматической классификации отзывов на приложения, показав эффективность комбинирования различных типов признаков.

В области глубокого обучения ключевыми работами стали исследования по применению трансформерных архитектур. Devlin и соавторы (BERT) [11] показали эффективность двунаправленного обучения языковых представлений. Liu с коллегами (RoBERTa) [12] улучшили оригинальную архитектуру BERT за счёт оптимизации процедуры обучения. Sanh и соавторы (DistilBERT) [13] предложили метод дистилляции знаний, позволяющий сократить размер модели на 40% при сохранении 95–97% точности. Для русского языка коллектив DeepPavlov под руководством Золотухиной и соавторов [14] разработал модель RuBERT, обученную на русскоязычных корпусах (новости, Википедия, социальные сети). Библиотека Flair, предложенная Akbik и соавторами [15], основана на контекстных символьных эмбеддингах, учитывающих окружение слова на уровне символов.

Классические методы машинного обучения (логистическая регрессия, метод опорных векторов, случайный лес) остаются актуальными благодаря интерпретируемости, высокой скорости обучения и меньшим требованиям к вычислительным ресурсам [3, 10]. Эти методы часто используются как бейзлайн для сравнения с более сложными нейросетевыми архитектурами.

Основные проблемы анализа тональности, выделяемые в современной литературе, включают: распознавание сарказма и иронии, многозначность слов и сленг, жаргоны, имплицитную оценку (выражение мнения без использования явно оценочных слов), а также проблему ошибочной оценки, когда пользовательская оценка не соответствует фактическому содержанию текста [4, 6].

Гипотеза исследования: комбинирование нескольких независимых инструментов анализа тональности, реализующих разные методологии, позволяет повысить надёжность и устойчивость оценки за счёт кросс-валидации результатов и компенсации индивидуальных недостатков моделей.

Цель работы – разработать и экспериментально оценить комбинированную методику анализа тональности русскоязычных диалогов на основе ансамбля моделей VADER, Flair, RuBERT, RoBERTa, DistilBERT, логистической регрессии, случайного леса и SVM.

2. Разработка методики

2.1. Постановка задачи

Пусть задан текст x_i из множества $X=\{x_1,...,x_n\}$. Имеется исходная разметка Yraw (рейтинг пользователя от 1 до 5), которая может содержать ошибки. Требуется построить функцию $F:X\rightarrow Y$, где $Y \in$ {негативный, нейтральный, позитивный}, максимизирующую соответствие истинной тональности.

2.2. Предлагаемая методика

Разработанная методика включает этапы: предобработка текста (нормализация регистра, удаление URL, упоминаний, хэштегов, нормализация пунктуации), многомодельный анализ (текст параллельно подаётся на все модели), агрегация результатов.

2.3. Математическая модель агрегации

Обозначим множество моделей как $M=\{m_1, m_2, ..., m_k\}$. Каждая модель m_j для входного текста x_i возвращает вектор вероятностей принадлежности к трем классам тональности (негативная, нейтральная, позитивная), например $m_j=[p_{neg}, p_{neu}, p_{pos}]$.

Ключевая идея заключается в вычислении финальной оценки путем усреднения предсказаний всех моделей. То есть где итоговый score округляется до ближайшего значения из дискретного множества {1, 3, 5}, соответствующих негативной, нейтральной и позитивной тональности. Для этого сначала вычисляется средний вектор вероятностей:

$$P_{final}(x_i) = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} m_j(x_i)$$

где $P_{final}(x_i)=[P_{neg}, P_{neu}, P_{pos}]$.

В более продвинутой версии модели будет использоваться не простое среднее, а взвешенное, где каждой модели m_j присваивается вес w_j, пропорциональный ее точности на валидационной выборке:

$$P_{final}(x_i) = \frac{\sum_{j=1}^{k} w_j m_j(x_i)}{\sum_{j=1}^{k} w_j}$$

Такой подход позволяет учитывать вклад каждой модели в финальное решение.

2.4. Выбранные модели

На основе проведённого обзора для экспериментального сравнения были отобраны восемь моделей, представляющих все три категории подходов, см. таблицу 1.

Таблица 1. Сравнительная характеристика выбранных моделей

Модель	Тип подхода	Сильные стороны	Слабые стороны
VADER	Лексико-статистический, словарный	Высокая скорость, не требует обучения, устойчив к шуму соцсетей	Не учитывает контекст, не различает иронию и сарказм
Flair	Глубокое обучение (RNN)	Учитывает контекст на уровне символов, многозычный	Требует больше данных, чем лексические методы
RuBERT	Трансформер	Учитывает контекст, высокие метрики на русскоязычных корпусах	Требует много размеченных данных
RoBERTa	Трансформер	Высокая точность, оптимизированное	Требует огромных объёмов данных,

		обучение, справляется с сарказмом	склонен к систематическим смещениям
DistilBERT	Трансформер (лёгкий)	На 40% меньше BERT, на 60% быстрее, сохраняет 95-97% точности	Потеря контекстной информации
Logistic Regression	Классическое машинное обучение	быстрый тренинг и инференс	Не учитывает порядок слов
Random Forest	Ансамбль решающих деревьев	Обрабатывает нелинейности, оценка важности признаков	Менее эффективен на разреженных текстовых данных
SVM	Метод опорных векторов	Эффективен в пространствах высокой размерности	Медленнее LR на больших данных

Для англоязычных моделей (VADER, RoBERTa, DistilBERT), которые заранее обучены под английский язык и у которых нет русскоязычных альтернатив, использовался встроенный модуль машинного перевода, переводящий русскоязычные предложения на английский язык. Модели Flair, RuBERT, логистическая регрессия, случайный лес и SVM анализировали русскоязычный оригинал.

2.5. Данные

Исходные данные составляют 1000 отзывов пользователей о мобильном приложении OZON. Каждый отзыв размечен авторским рейтингом (см. рисунок 1), преобразованным в три класса: рейтинг 1-2 = негативный (63,7%), рейтинг 3 = нейтральный (11,6%), рейтинг 4-5 = позитивный (24,7%).

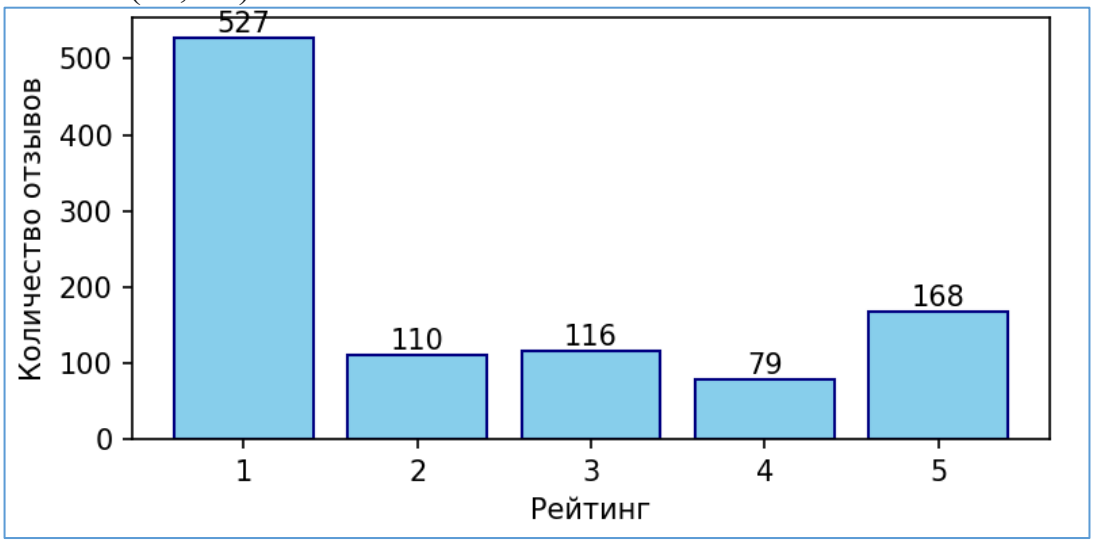


Рисунок 1. Распределение рейтингов

На рисунке 2 представлено распределение пользовательских оценок в зависимости от длины отзыва. Короткие тексты характеризуются наибольшей вариативностью оценок: здесь встречаются как крайне

негативные, так и позитивные отзывы. С увеличением длины текста наблюдается постепенное смещение в сторону негативных и нейтральных оценок. Позитивные отзывы, напротив, чаще имеют небольшую длину. Это может объясняться тем, что пользователи, оставляя негативный развёрнутый комментарий, стремятся подробно описать проблему, тогда как положительные эмоции чаще выражаются кратко.

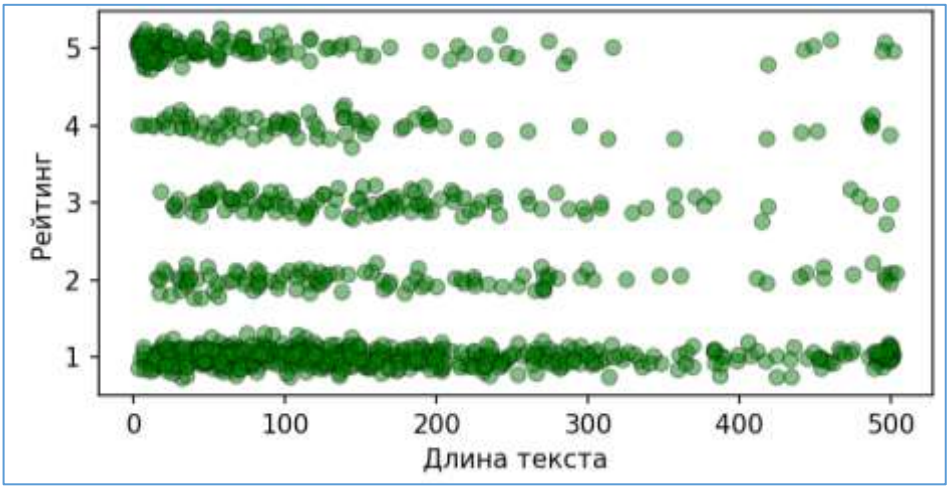


Рисунок 2. Зависимость рейтинга от длины текста

3. Результаты эксперимента

3.1. Распределение предсказаний моделей

Анализ показал кардинальные различия в поведении моделей (табл. 2).

Таблица 2. Распределение предсказанных классов моделями

Модель	Негативный (1)	Нейтральный (3)	Позитивный (5)	Среднее
VADER	415	258	327	2,84
Flair	537	351	112	2,15
RuBERT	414	451	135	2,44
RoBERTa	755	48	197	1,88
DistilBERT	569	0	431	2,72
Logistic Regression	324	573	103	2,56
SVM	322	562	116	2,59
Random Forest	334	541	125	2,58
Сумматор	646	201	153	2,46
Пользователи	637	116	247	2,25

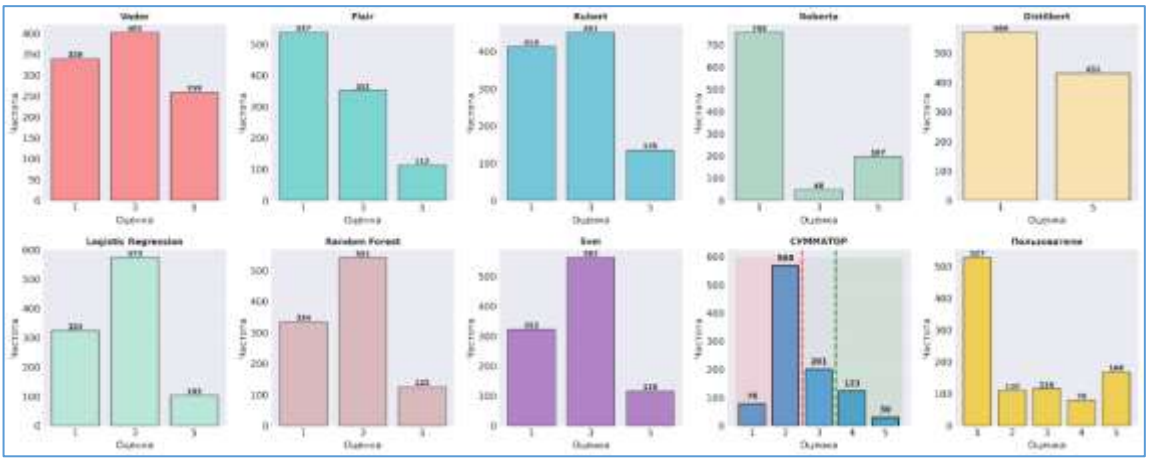


Рисунок 3. Распределение оценок сумматора и моделей по классам тональности

По таблице видно, что VADER по средней оценке дальше всего от эталонного среднего. Flair склонен к негативному классу, методы Logistic Regression, Random Forest и SVM склонны к нейтральному классу. RoBERTa сильно смещена в сторону негатива. DistilBERT показывает распределение 43,1% позитивных и 56,9% негативных отзывов. Средняя оценка сумматора 2,46 близка к пользовательской 2,25. Рисунок 3 демонстрирует более подробное распределение оценок сумматора по трём классам тональности.

3.2. Точность совпадения с реальными оценками

Таблица 3. Детальная точность моделей по классам

Модель	Negative (1-2) (n=637)	Neutral (3) (n=116)	Positive (4-5) (n=247)	Общая точность
VADER	51,3%	22,4%	63,2%	50,9%
Flair	64,5%	50,9%	38,9%	56,6%
RuBERT	54,5%	57,8%	51,8%	54,2%
RoBERTa	91,8%	5,2%	64,4%	75,0%
DistilBERT	57,5%	0,0%	43,7%	47,4%
Logistic Regression	39,9%	63,8%	31,6%	40,6%
Random Forest	40,3%	61,2%	32,4%	40,8%
SVM	39,4%	56,0%	32,0%	39,5%
Сумматор	79,0%	25,0%	52,6%	66,2%

Опираясь на таблицу 3 можно сделать такие выводы как:

1. **VADER** показывает сбалансированную точность на положительных и отрицательных отзывах, но низкую на нейтральных.
2. **Flair** показывает сбалансированную точность на негативных и нейтральных отзывах, но низкую на положительных
3. **RoBERTa** показывает максимальную общую точность среди отдельных моделей (75,0%) за счёт высокого распознавания негативного класса (91,8%), но практически не распознаёт нейтральные отзывы (5,2%).

4. Классические методы (**Logistic Regression, Random Forest, SVM**) демонстрируют лучшую точность на нейтральном классе (50,9–63,8%), что делает их полезными для задач, где важен нейтральный класс, однако общая точность классических методов невысока (39,5–40,8%).

5. **RuBERT** является самой сбалансированной среди трансформерных моделей. Разброс точности между классами минимален (51,8–57,8%).

6. **DistilBERT** оказывает точность 57,5% на негативных и 43,7% на позитивных отзывах, однако полностью не распознаёт нейтральный класс.

7. **Сумматор** из 8 моделей достигает 66,2% общей точности и показывает высокую точность на негативном классе (79,0%), что является вторым результатом после RoBERTa. Ансамбль компенсирует недостатки каждой модели: смещение RoBERTa в негатив, избыточную нейтральность Flair и классических методов, низкую точность VADER на нейтральных отзывах, а также проблемы DistilBERT с распознаванием нейтрального класса.

3.3. Обсуждение полученных результатов

Анализ 1000 отзывов пользователей о мобильном приложении позволяет сделать следующие выводы о характере пользовательского поведения и качестве разметки данных.

Во-первых, пользователи склонны к полярным оценкам. Более 70% отзывов имеют оценку 1 или 5 звёзд. Люди оставляют развёрнутое мнение только тогда, когда испытывают сильные эмоции. Умеренные оценки встречаются значительно реже, что подтверждает известное J-образное распределение.

Во-вторых, текст отзыва часто не соответствует выставленной оценке. Даже лучшие модели ошибаются в 25% случаев, а для нейтральных отзывов ошибка достигает 95%. Пользователь может поставить 3 звезды, но написать гневный текст, или наоборот 5 звёзд с перечнем недостатков. Это означает, что пользовательский рейтинг не может служить «золотым стандартом» для обучения моделей сентимент-анализа.

В-третьих, негативные отзывы оказались самыми «честными». Отзывы с оценкой 1 звезда практически всегда содержат явные негативные маркеры и корректно распознаются моделями. Позитивные же отзывы с 5 звёздами часто завышены ибо пользователи ставят высшую оценку «за старания», «за идею» или из нежелания обидеть разработчиков, даже если есть недостатки.

В-четвёртых, нейтральные и промежуточные оценки (2, 3 и 4 звезды) представляют собой наиболее сложный для анализа сегмент. Тексты таких отзывов содержат смешанную, амбивалентную тональность: пользователь одновременно доволен одним аспектом и недоволен другим. Именно поэтому глобальные модели, обученные на полярных текстах, показывают на этих классах наихудшие результаты.

Таким образом, пользовательская оценка в виде звёзд является ненадёжным индикатором реальной тональности текста. Для корректного

анализа отзывов необходимо комбинировать количественные рейтинги с качественным анализом текста, а при разметке обучающих данных использовать ручную или аспектную оценку, а не автоматическое преобразование рейтинга в класс тональности.

4. Заключение

В работе разработана и экспериментально апробирована комбинированная методика анализа тональности русскоязычных диалогов на основе ансамбля восьми моделей (VADER, Flair, RuBERT, RoBERTa, DistilBERT, логистическая регрессия, случайный лес, SVM). Показано, что предложенный подход:

1. Достигает общей точности 66,2%.
2. Обеспечивает более сбалансированное распознавание трёх классов тональности по сравнению с экстремальными моделями.
3. Выявляет систематические расхождения между пользовательскими оценками и предсказаниями моделей.

Перспективы дальнейших исследований: оптимизация весов моделей с использованием генетических алгоритмов, добавление моделей, обученных на диалоговых корпусах, расширение набора данных, применение взвешенного ансамбля для повышения общей точности.

Список литературы:

1. Семина Т.А. Анализ тональности текста: современные подходы и существующие проблемы // Социальные и гуманитарные науки. – 2020. – № 04.008. – С. 47–64.
2. Басина П.А., Дунаева Д.О., Саркисова А.Ю. Валидация моделей машинного обучения для автоматизированного определения тональности русскоязычных текстов // Вестник Томского государственного университета. – 2022. – № 485. – С. 206–216.
3. Самигулин Т.Р., Джурабаев А.Э.У. Анализ тональности текста методами машинного обучения // Научный результат. Информационные технологии. – 2021. – Т. 6, № 1.
4. Двойникова А.А., Карпов А.А. Аналитический обзор подходов к распознаванию тональности русскоязычных текстовых данных // Информационно-управляющие системы. – 2020. – № 4. – С. 20–30.
5. McFarland, 2024 — McFarland A. 10 Best Python Libraries for Sentiment Analysis // UNIT.AI. 2024. URL: https://www.unite.ai/10-best-python-libraries-for-sentiment-analysis/ (дата обращения: 24.11.2025).
6. Smetanin, 2020 — Smetanin S. The Applications of Sentiment Analysis for Russian Language Texts: Current Challenges and Future Perspectives // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 110693-110719. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3002215
7. Pagano D., Maalej W. User feedback in the appstore: An empirical study // 21st IEEE International Requirements Engineering Conference (RE). 2013. P. 125–134.
8. Guzman E., Maalej W. How do users like this feature? A fine grained sentiment analysis of app reviews // 22nd IEEE International Requirements Engineering Conference (RE). 2014. P. 153–162.
9. Chen N., Lin J., Hoi S.C., Xiao X., Zhang B. AR-Miner: mining informative reviews for developers from mobile app marketplace // Proceedings of the 36th International Conference on Software Engineering (ICSE). 2014. P. 712–723.

10. Maalej W., Kurtanović Z., Nabil H., Stanik C. On the automatic classification of app reviews // Requirements Engineering. 2016. Vol. 21. P. 311–331.

11. 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.

12. Liu Y., Ott M., Goyal N., Du J., Joshi M., Chen D., Levy O., Lewis M., Zettlemoyer L., Stoyanov V. RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach // arXiv preprint arXiv:1907.11692. 2019.

13. Sanh V., Debut L., Chaumond J., Wolf T. DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter // arXiv preprint arXiv:1910.01108. 2019.

14. Золотухина М., Клышинский Э., Лебедев И., и др. DeepPavlov: open-source library for conversational AI // Proceedings of the 29th International Conference on Computational Linguistics (COLING). 2020. P. 1–6.

15. Akbik A., Bergmann T., Blythe D., Rasul K., Schweter S., Vollgraf R. FLAIR: An easy-to-use framework for state-of-the-art NLP // Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the ACL (Demonstrations). 2019. P. 54–59.

УДК 004.056

Хузин С. Л., Аюпова А. Р.
Уфимский университет науки и технологий, Нефтекамский филиал, Нефтекамск, Россия

ЗАЩИТА ДАННЫХ В СИСТЕМАХ ГЕНЕРАТИВНОГО ИИ: АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ УТЕЧЕК ПРОМПТОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕНЕРАЦИИ

Аннотация. В статье анализируются угрозы утечки промптов и результатов генерации в системах искусственного интеллекта. Рассматриваются основные векторы атак, включая извлечение обучающей выборки и эксплуатацию долговременной памяти моделей. Предлагаются технические механизмы защиты: дифференциальная приватность, обфускация, семантическая фильтрация и криптографическая изоляция. Оцениваются требования российского законодательства в области персональных данных и локализации баз данных. Обосновывается необходимость комплексного применения организационных и правовых мер для обеспечения информационной безопасности генеративных систем.

Ключевые слова: генеративный искусственный интеллект, защита данных, утечка промптов, дифференциальная приватность, обфускация, семантическая фильтрация, гомоморфное шифрование, персональные данные, локализация баз данных, информационная безопасность.

Стремительное внедрение генеративных нейросетевых архитектур, в том числе больших языковых моделей и диффузионных генераторов изображений, в корпоративные и государственные информационные системы сопровождается ростом рисков, связанных с непреднамеренным или злонамеренным раскрытием чувствительных данных. Промпт, представляющий собой структурированный или неструктурированный текстовый запрос, часто содержит персональные данные, сведения, составляющие коммерческую или врачебную тайну, а также метаинформацию о внутренних процессах организации. Результат генерации, в свою очередь, может выступать не только как ответ на запрос, но и как источник для обратного восстановления исходных данных, включая примеры из обучающего корпуса.

Цель настоящей работы заключается в систематизации механизмов предотвращения утечек промптов и результатов генерации с позиций технической защиты информации и соответствия правовым требованиям.

Уязвимости генеративных моделей могут быть разделены на четыре основные группы. Первая группа — атаки с извлечением обучающей выборки, при которых злоумышленник с помощью специально сконструированных промптов добивается воспроизведения модели фрагментов исходных данных, например, персональных записей или парольных фраз. Данный вектор особенно опасен для моделей, обученных на нефильтрованных корпусах без применения дифференциальной приватности. Вторая группа — инференс-

атаки, направленные на восстановление параметров состояния модели или входящих запросов через анализ выходных сигналов. Сюда относятся атаки по теням моделей, атаки с членством в выборке и градиентные инверсии. В системах, предоставляющих доступ к логитам или вероятностям токенов, возможно восстановление исходного промпта с точностью до лексического состава [1].

Третья группа связана с эксплуатацией механизмов долговременной памяти, реализуемых через контекстные окна, векторизованные базы знаний и диалоговые истории. При отсутствии должной сегрегации данных промпт одного пользователя может быть косвенно передан другому при последующем взаимодействии с моделью. Это противоречит принципам обработки персональных данных, установленным статьей 6 Федерального закона «О персональных данных», согласно которым обработка должна ограничиваться достижением конкретных, заранее определенных и законных целей. Четвертая группа — уязвимости в цепочке поставок, включая вредоносные модификации предобученных весов, компрометацию систем управления версиями артефактов и недокументированные функции в программных библиотеках для работы с трансформерами. В результате злоумышленник может внедрить подсистему, сохраняющую все входящие промпты на внешний сервер, что квалифицируется как негласное получение информации.

Защита данных на стадии формирования запроса требует сочетания методов фильтрации, обфускации и криптографической изоляции. Фильтрация входящих промптов на основе регулярных выражений и семантических анализаторов позволяет обнаруживать и блокировать отправку в модель явных конфиденциальных паттернов, например, номеров банковских карт, страховых свидетельств или паспортных данных. Однако данный подход уязвим для атак с ресемплированием и переформулированием.

Как верно отмечает Агафонова, О.Б., обфускация промптов подразумевает замену чувствительных фрагментов на псевдонимы или синтетические сущности до того, как запрос поступит в нейросеть. Для этого используются предобученные модели распознавания именованных сущностей, адаптированные под специфику предметной области. Постобработка результатов генерации включает обратное преобразование псевдонимов в исходные значения, что исключает попадание реальных данных в лог модели или в историю диалога. Технически это реализуется в виде прослойки между пользовательским интерфейсом и ядром генеративной системы, что соответствует требованиям об организации контроля доступа согласно приказу ФСТЭК России «Об утверждении Требований к защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах» [2].

Криптографическая изоляция предполагает выполнение генеративной модели в доверенной среде исполнения с использованием технологии полностью гомоморфного шифрования. В этом случае промпт поступает на

вход модели в зашифрованном виде, а результат генерации также возвращается в шифрованном виде, причем модель оперирует с шифротекстами без их расшифрования. Несмотря на высокую вычислительную сложность, для государственных и банковских систем данный метод становится приоритетным.

Утечка результатов генерации может происходить как через штатные ответы модели, содержащие нежелательные включения, так и через побочные каналы — временные файлы, кэш логитов, метаданные о длительности генерации и статистику использования токенов. Для предотвращения этого применяется многоуровневая фильтрация выходных последовательностей. Семантический фильтр выходов оценивает каждый сгенерированный токен или предложение на предмет принадлежности к категориям запрещенных данных. При обнаружении фрагмента, вероятно воспроизводящего персональные данные или фрагменты обучающей выборки, фильтр может заменить токен на нейтральный, прервать генерацию или перезапустить процесс с измененными параметрами температуры и вероятностного ядра. Данный подход эффективен против атак с извлечением, однако требует эталонного набора чувствительных данных для сравнения [3].

Регуляризация выходного пространства с помощью алгоритмов дифференциальной приватности, в частности механизма экспоненциального шума, гарантирует, что наличие или отсутствие конкретного элемента в обучающей выборке статистически неразличимо на выходе модели. Это снижает точность атак с членством в выборке до уровня, не превышающего заданный параметр конфиденциальности. Российские нормативные документы в области защиты информации пока не содержат прямых требований к уровню дифференциальной приватности, однако рекомендации Банка России по безопасной разработке систем искусственного интеллекта указывают на целесообразность применения таких методов для финансовых организаций. Дополнительным механизмом выступает управление метаданными генерации. Логирование должно производиться в обезличенном виде, без сохранения исходных промптов, с автоматической ротацией и шифрованием на диске. В соответствии с частью 3 статьи 22 Федерального закона «Об информации, информационных технологиях и о защите информации», оператор информационной системы обязан обеспечивать неавтоматизированную защиту информации при ее обработке техническими средствами, что подразумевает и защиту побочных каналов утечки.

Действующее российское законодательство накладывает ряд ограничений на обработку данных с использованием технологий искусственного интеллекта. Федеральный закон «О персональных данных» требует получения согласия субъекта персональных данных на обработку, включая передачу данных в недетерминированные системы, где конечный алгоритм обработки не может быть полностью описан. Для генеративных моделей это означает необходимость информирования пользователя о том, что

его промпт может быть использован для дообучения модели и потенциально воспроизведен в ответах другим пользователям. Некоторые организации реализуют отдельную опцию «не использовать мои данные для улучшения модели», что соответствует принципу минимизации обработки [4].

Требование о локализации баз данных на территории Российской Федерации (статья 18 Федерального закона «О персональных данных») распространяется и на системы генеративного ИИ, если они обрабатывают персональные данные российских граждан. Следовательно, все журналы промптов, кэш результатов генерации и векторизованные базы знаний должны храниться на серверном оборудовании, физически находящемся в пределах юрисдикции Российской Федерации. Для гибридных систем, использующих облачные модели, это создает техническую проблему, решаемую через развертывание локальных инстанций модели с последующим синхронизированным обучением без выгрузки чувствительных данных. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях в статье 13.11 предусматривает штрафы за обработку персональных данных без правовых оснований, а также за непредоставление оператором сведений об обработке.

Ни одна совокупность технических механизмов не обеспечивает полной защиты без организационных мер. Прежде всего, требуется разграничение прав доступа к системам генеративного ИИ на основе ролевой модели: оператор модели имеет право отправлять промпты и получать результаты, но не имеет права просматривать историю чужих запросов или выгружать веса модели. Администратор безопасности наделяется правом аудита логов без возможности их модификации. Разработчик политик безопасности определяет перечень категорий данных, запрещенных к передаче в модель. Важнейшей мерой является обучение пользователей безопасной работе с промптами. Для тестовых и обучающих сред рекомендуется использовать синтетические датасеты, не содержащие реальных данных. Периодический аудит выходов модели с применением методов статического и динамического анализа позволяет выявлять новые типы утечек, не учтенные в начальной модели угроз [5].

Таким образом, защита промптов и результатов генерации в системах искусственного интеллекта требует комплексного сочетания технических, правовых и организационных мер. Наиболее эффективными механизмами предотвращения утечек выступают дифференциальная приватность, обфускация входящих запросов, семантическая фильтрация выходных последовательностей и криптографическая изоляция вычислений. Соблюдение нормативно-правовых требований о локализации персональных данных и минимизации их обработки является обязательным условием безопасного применения генеративных моделей в российской юрисдикции.

Список литературы:

1. Д.Е. Намиот, Е.А. Ильюшин О киберрисках генеративного Искусственного Интеллекта // International Journal of Open Information Technologies. 2024. №10. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/o-kiberriskah-generativnogo-iskusstvennogo-intellekta (дата обращения: 18.04.2026).

2. Агафонова, О.Б. Как искусственный интеллект влияет на кибербезопасность / О.Б. Агафонова. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2024. — № 40 (539). — С. 1-4.

3. Рожкова М.А. ИИ-генерации, плагиат и «самоплагиат» в контексте авторского права [Электронный ресурс] // Закон.ру. 2025.

4. Воеводин В.А. Модель оценки функциональной устойчивости элементов информационной инфраструктуры для условий воздействия множества компьютерных атак. Информатика и автоматизация, 2023, 22(3), с. 691-715

5. Макарова О.С., Поршнев С.В. Оценивание вероятностей компьютерных атак на основе функций // Безопасность информационных технологий. 2020, т. 27, № 2, с. 86-96.

УДК 004.932

Неизвестный С. И., Кочубей А. А.
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ КАСКАДНОЙ ДЕТЕКЦИИ ОБЪЕКТОВ: ОТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО УТОЧНЕНИЯ ДО ОТЛОЖЕННОГО ВЫЗОВА МОДЕЛЕЙ

Аннотация. В работе предлагается таксономия существующих каскадных схем детекции объектов в компьютерном зрении. Рассмотрены три класса методов: последовательное уточнение (sequential refinement), каскады с отложенным вызовом (deferral cascades) и пространственные схемы «грубо-в-точно» (coarse-to-fine spatial). Для каждого класса приведены репрезентативные методы, проанализированы механизмы работы и вычислительные характеристики. На основе опубликованных данных по бенчмарку MS COCO проведён сравнительный анализ качества и эффективности, сформулированы сценарии применимости каждого класса. Выявлены открытые проблемы и перспективы гибридизации схем.

Ключевые слова: детекция объектов, каскадные модели, coarse-to-fine, deferral cascade, Cascade R-CNN, компьютерное зрение, COCO.

Введение

Детекция объектов остаётся одной из центральных задач компьютерного зрения. За последнее десятилетие развитие глубокого обучения привело к резкому росту качества детекторов, однако одновременно обнажило фундаментальный компромисс: более точные модели требуют больше вычислений, а быстрые модели теряют качество, особенно на сложных и малоразмерных объектах. Каскадные схемы детекции возникли как ответ на этот компромисс: вместо одной монолитной модели используется последовательность (или комбинация) нескольких моделей, взаимодействующих по заранее определённой схеме.

Каскадный подход имеет долгую историю. Его основы заложены в работе Viola и Jones 2001 года, где последовательность слабых бустинговых классификаторов использовалась для ускорения детекции лиц за счёт раннего отсева фоновых регионов [1]. Современные каскадные детекторы — такие как Cascade R-CNN — реализуют принципиально другой механизм: последовательное уточнение гипотез с ростом порога IoU [3]. Между этими двумя полюсами располагается обширное пространство методов, включая пространственные схемы coarse-to-fine, адаптивные ансамбли и каскады с условным вызовом тяжёлых моделей.

Несмотря на обилие работ, единой классификации каскадных схем в литературе не существует [2]. Методы сравниваются, как правило, внутри узкой подгруппы — например, R-CNN-варианты сравниваются между собой — и на разных условиях эксперимента, что затрудняет принятие практических решений при выборе схемы под конкретную задачу.

Цел и вклад статьи. Настоящая работа носит аналитический характер и преследует следующие цели:

1. Предложена таксономия каскадных схем детекции, выделяющая три класса на основе механизма взаимодействия моделей;
2. Для каждого класса описаны ключевые методы, проанализированы механизмы, гиперпараметры и условия применимости;
3. На основе опубликованных результатов на MS COCO проведён сравнительный анализ по метрикам качества (mAP) и эффективности (GFLOPs, FPS);
4. Сформулированы практические рекомендации по выбору каскадной схемы и обозначены направления гибридизации.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 излагается предлагаемая таксономия. Раздел 3 содержит детальный обзор методов по классам. В разделе 4 проводится сравнительный анализ. Раздел 5 посвящён обсуждению trade-offs и открытых проблем. Раздел 6 завершает статью.

Предлагаемая таксономия

Предлагается классифицировать каскадные схемы детекции объектов по механизму взаимодействия моделей в пайплайне. Выделяются три класса.

Класс A. Sequential refinement (последовательное уточнение)

Принцип. Вход обрабатывается всеми моделями цепочки последовательно; каждая следующая модель получает на вход результат предыдущей и уточняет его. Все входы проходят через весь каскад.

Ключевые гиперпараметры: число стадий N, прогрессия качественных порогов (обычно IoU 0,5 → 0,6 → 0,7), схема передачи признаков между стадиями.

Что оптимизируется: качество (mAP) при приемлемой дополнительной стоимости.

Класс B. Deferral cascade (каскад с отложенным вызовом)

Принцип. Лёгкая модель обрабатывает все входы; на основе её уверенности (confidence, энтропия и т. п.) принимается решение — считать предсказание окончательным или передать вход более тяжёлой модели. Большая часть входов не доходит до дорогой модели.

Ключевые гиперпараметры: порог отложенного вызова (deferral threshold), калибровка уверенности, архитектуры «лёгкой» и «тяжёлой» ступеней.

Что оптимизируется: эффективность (средний FLOPs/FPS) при сохранении качества.

Класс C. Coarse-to-fine spatial (пространственно «грубо-в-точно»)

Принцип. Грубая модель предсказывает приблизительную локализацию интересующих регионов на низком разрешении, точная модель применяется только в выбранных точках/окнах высокого разрешения. Экономия достигается за счёт пространственной разреженности инференса.

Ключевые гиперпараметры: порог интереса на грубой карте, размер и форма окон уточнения, число уровней пирамиды.

Что оптимизируется: качество на сложных масштабах (особенно малоразмерных объектах) при контролируемой стоимости.

Соотношение классов

Классы не взаимоисключающие: Cascade R-CNN (класс A) можно комбинировать с coarse-to-fine пирамидой признаков (класс C); deferral-гейт можно применять перед Cascade R-CNN. Таксономия описывает доминирующий механизм схемы. Соотношение трёх классов показано на рисунке 1.

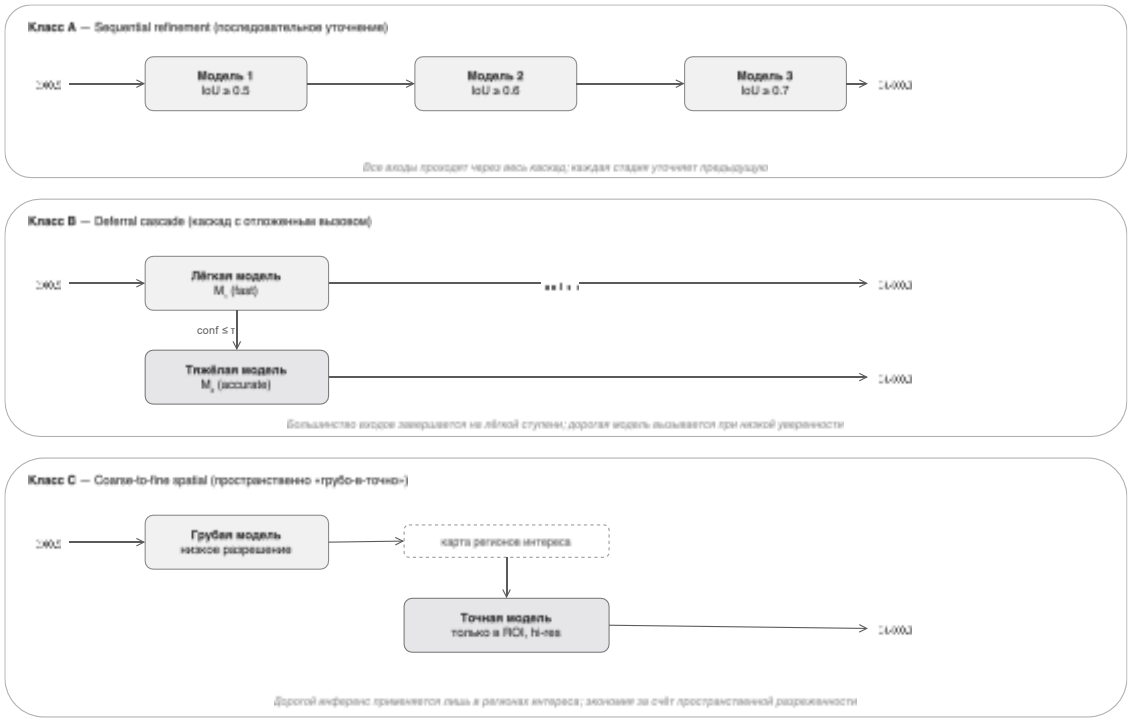


Рисунок 1 — Три класса каскадных схем детекции объектов. Источник: составлено автором

Обзор методов по классам

Sequential refinemen. Ключевой представитель — **Cascade R-CNN** (Cai & Vasconcelos, 2018; расширенная версия 2019). Авторы обратили внимание на парадокс высокого качества: детектор, обученный с низким порогом IoU (например, 0,5), производит шумные детекции, тогда как повышение порога ведёт к переобучению из-за экспоненциально сокращающегося числа положительных примеров [3]. Решение — обучить последовательность R-CNN-голов с возрастающими порогами IoU (0,5 → 0,6 → 0,7), где выход каждой головы служит обучающим распределением для следующей. На инференсе тот же каскад применяется последовательно, устраняя рассогласование между распределением предложений и оптимальным порогом детектора.

HTC (Hybrid Task Cascade) развивает эту идею для совместной детекции и сегментации: добавляется обмен признаками между стадиями и пространственный контекст сегментационной ветви [4]. HTC стал основой ряда победных решений на COCO-челленджах.

Dynamic R-CNN делает пороги IoU и параметры функции потерь адаптивными по мере обучения, что обеспечивает плавный переход от «мягкого» к «строгому» режиму [5]. По сути это sequential refinement с динамически изменяющимися условиями.

PCIC (Progressive Cross-stage Interactive Cascade, 2024) — свежее расширение каскадной R-CNN-головы на 3D-детекцию: агрегация признаков со всех предшествующих стадий для детекции объектов на дальних дистанциях в LiDAR-сценах.

Свойства класса A: стабильный прирост mAP, особенно в области высокого IoU; простая интеграция поверх существующего двухстадийного детектора; стоимость инференса растёт линейно с числом стадий.

Deferral cascades. Классический представитель — каскад **Viola–Jones** (2001), где слабые Haar-классификаторы организованы в цепочку с ранним отсевом [1]. Несмотря на архаичность базовых признаков, архитектурный принцип — «отказ от вычислений при высокой уверенности в отрицательном ответе» — остаётся актуален.

В современной литературе deferral-каскады исследовались преимущественно для классификации изображений и для NLP [6]. Для полной детекции объектов deferral-схема в чистом виде встречается реже, поскольку понятие «confidence одного предсказания» плохо переносится на набор объектов на изображении. Тем не менее подход успешно применяется на уровне региона/крупа: лёгкий детектор генерирует грубые предложения, а тяжёлый применяется только к «неоднозначным» регионам.

Работа **Gatekeeper** (Narasimhan и др., 2025) вводит специальную функцию потерь для калибровки меньшей модели в каскаде: малая модель обучается «знать, чего она не знает», и уверенно обрабатывать простые случаи, передавая сложные дальше [7].

Отдельный вектор — **speculative cascades** (Narasimhan и др., 2024): комбинация deferral-логики с speculative execution, когда тяжёлая модель проверяет предсказания лёгкой параллельно, а не последовательно [8].

Свойства класса B: до нескольких раз меньший средний FLOPs при сопоставимом качестве; сильно зависит от качества калибровки лёгкой модели; требует эмпирического подбора порога отложенного вызова.

Coarse-to-fine spatial. Основная идея — избегать полного прохода дорогой модели по всей картинке. В **FuSt** (Funnel-Structured Cascade, 2016) детекция лиц в разных ракурсах организована как многоуровневая воронка: быстрые LAB-каскады генерируют кандидатов, грубые MLP-каскады отсеивают часть, затем единый точный MLP-каскад с shape-indexed признаками выполняет финальную детекцию [9].

QueryDet (CVPR 2021) — более свежий пример. На низкоразрешённых признаках предсказываются приблизительные координаты малоразмерных объектов (ключи запроса), затем на высокоразрешённых признаках в соответствующих позициях строится разреженная карта, по которой работает разреженный detection head [10]. Авторы сообщают об ускорении детекции на высоком разрешении в среднем в ~3 раза при приросте AP_S на 2 пункта на COCO.

Cascaded coarse-to-fine deep kernel networks (Sahbi, 2018) применяют аналогичную идею к детекции изменений на спутниковых снимках: ранние стадии сети дёшевы и отсекают большинство паттернов, поздние — дороже и точнее [11].

Свойства класса C: особенно эффективен для малоразмерных объектов и изображений высокого разрешения; требует специальной архитектуры (разреженные свёртки, многоуровневые признаки); выигрыш в скорости сильно зависит от доли «интересных» регионов на сцене.

Сравнительный анализ

Прямое сравнение методов затруднено рядом факторов: разные backbone, разные протоколы обучения (1x vs 3x schedule), разные аугментации, иногда различающиеся версии COCO. Поэтому ниже приводятся агрегированные данные из оригинальных публикаций при фиксированном backbone (ResNet-50 / ResNet-50-FPN где возможно), а числа в таблице следует трактовать как индикативные, а не как результат единого эксперимента.

В качестве метрик качества используются стандартные COCO-метрики: mAP@[0.5:0.95] (основная), mAP@0.5 и AP_S (precision на малоразмерных объектах) [2]. Эффективность оценивается по GFLOPs (вычислительная стоимость прохода) и FPS (измеренные в оригинальных публикациях, чаще на одной GPU класса V100/Titan Xp — точная платформа варьируется).

Таблица 1 — Сравнение репрезентативных методов на MS COCO val2017 (backbone — ResNet-50 / ResNet-50-FPN)

Метод	Класс	mAP	mAP@0.5	AP_S	Относит. GFLOPs	Примечание
Faster R-CNN (baseline) [15]	—	~37.4	~58.1	~21.2	1.0×	опорная точка
Cascade R-CNN [3]	A	~40.3	~58.6	~22.5	~1.3×	+2.9 mAP vs baseline
HTC [4]	A	~43.6	~62.6	~24.8	~1.7×	детекция + сегм.
Dynamic R-CNN [5]	A	~39.1	~58.0	~22.1	~1.05×	адапт. пороги

QueryDet (RetinaNet) [10]	C	~38.5	—	~24.6	~0.9×	ускор. на high-res
Deferral-каскад (общий) [6, 7]	B	≈ тяжёлая	—	—	0.3–0.7×	зависит от порога

Источник: составлено автором на основе данных оригинальных публикаций [3, 4, 5, 10, 15]

*Прочерк означает, что число недоступно или неприменимо напрямую.

Класс A (sequential refinement) даёт наиболее стабильный прирост качества: +2–6 mAP относительно single-stage baseline. Основная стоимость — линейный рост вычислений с числом стадий (обычно 1,3–1,7× относительно одноступенчатого аналога). Выигрыш особенно заметен на высоких IoU (@0.75 и выше), что критично для приложений, требующих точной локализации [3].

Класс B (deferral) даёт принципиально иной профиль: средняя стоимость инференса может снижаться в 2–3 раза при сопоставимом mAP, однако худший случай — когда порог срабатывает почти для каждого входа — хуже, чем у одиночной тяжёлой модели [7]. Класс хорошо подходит для задач с высокой долей «простых» изображений: потоковая обработка видео с неподвижной камерой, промышленный контроль, где большинство кадров — фон.

Класс C (coarse-to-fine spatial) показывает наибольший выигрыш на малоразмерных объектах и изображениях высокого разрешения [10]. QueryDet улучшает AP_S на 2 пункта при ускорении работы на высоком разрешении ~3×. Однако на стандартных COCO-изображениях 640×640 без выраженного масштабного разброса выигрыш скромнее. Схема соответствия классов задачам показана на рисунке 2.

Рисунок 2 — Соответствие классов каскадных схем задачам и приоритетам
Источник: составлено автором.

Абсолютные числа сильно зависят от backbone: переход с ResNet-50 на Swin-L или ConvNeXt-XL даёт больший прирост mAP, чем выбор любой из каскадных схем. Однако относительный выигрыш каскадной схемы над single-stage аналогом с тем же backbone, как правило, сохраняется в диапазоне +2–4 mAP для класса A [12]. Это означает, что каскадные схемы — аддитивный механизм поверх прогресса в архитектурах.

На PASCAL VOC (более простой датасет) выигрыш sequential refinement скромнее, поскольку baseline уже достигает ~80 mAP@0.5 и пространства для улучшения меньше. На датасетах с малоразмерными объектами (VisDrone, TinyPerson) класс C выигрывает у класса A в AP_S [10].

Обсуждение

На основе проведённого анализа можно сформулировать следующие эвристики выбора схемы:

- **Высокое качество локализации важнее скорости** (AR/VR, автономное вождение, робототехника): класс A — Cascade R-CNN [3], HTC [4].
- **Edge-развёртывание, ограниченный вычислительный бюджет, поточная обработка**: класс B (deferral); при этом критична калибровка лёгкой модели [7].
- **Аэрофотосъёмка, спутниковые снимки, задачи с малоразмерными объектами**: класс C — QueryDet [10], coarse-to-fine пирамиды [14].
- **Общая детекция на COCO без специфических ограничений**: Cascade R-CNN остаётся сильной универсальной опорной точкой [12].

Совместное обучение этапов. Большинство существующих каскадных схем обучают стадии последовательно или с фиксированной структурой. Полное end-to-end обучение всего каскада (включая правила передачи в deferral-схемах) остаётся открытой задачей, частично адресованной в недавней работе Gatekeeper [7].

Адаптивный порог передачи. В deferral-каскадах порог обычно задаётся статически. Адаптация порога под контекст изображения — сложность сцены, плотность объектов — потенциально даёт лучший Pareto-фронт «скорость / качество» [8].

Latency на edge-устройствах. Метрики GFLOPs и FPS плохо коррелируют с реальной задержкой на мобильных процессорах, где узкое место — передача данных и накладные расходы на вызов ядер [6]. Эмпирическая оценка каскадных схем на мобильных и встраиваемых платформах в литературе представлена слабо.

Наиболее естественный вектор развития — **гибриды A+B**: внутренний каскад уточнения внутри тяжёлой модели и внешний deferral-гейт, решающий, запускать ли её вообще. Такая схема объединяет высокое качество Cascade R-CNN с эффективностью deferral-каскадов. Предварительно аналогичный принцип встречается в QueryDet [10], но систематического изучения гибридных схем в литературе пока недостаточно.

Второй перспективный вектор — **speculative cascades** для детекции по аналогии с текущими работами в NLP [8]: параллельный запуск лёгкой и тяжёлой моделей с проверкой согласия. В CV это потенциально позволяет устранить главный недостаток deferral-каскадов — последовательную задержку.

Заключение

В работе предложена таксономия каскадных схем детекции объектов, разделяющая их на три класса: sequential refinement, deferral cascade и coarse-to-fine spatial. Для каждого класса описаны механизмы работы, проанализированы репрезентативные методы и обобщены опубликованные экспериментальные результаты на MS COCO.

Сравнительный анализ показывает, что три класса не конкурируют, а дополняют друг друга: sequential refinement оптимизирует качество, deferral cascade — среднюю стоимость инференса, coarse-to-fine spatial — работу с малоразмерными объектами на высоком разрешении. Выбор схемы должен определяться приоритетами приложения и характеристиками входных данных.

Таким образом, при проектировании систем компьютерного зрения рекомендуется рассматривать каскадные схемы не как альтернативу совершенствованию архитектур, а как аддитивный механизм, усиливающий любой baseline. Наиболее перспективным направлением будущих исследований представляется систематическое изучение гибридных схем, объединяющих преимущества нескольких классов, а также адаптивные правила передачи и совместное обучение всех этапов каскада.

Список литературы:

1. Viola, P. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features / P. Viola, M. Jones // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2001. — Vol. 1. — P. I–511.
2. Lin, T.-Y. Microsoft COCO: Common objects in context / T.-Y. Lin [и др.] // Proceedings of ECCV. — 2014. — P. 740–755.
3. Cai, Z. Cascade R-CNN: Delving into high quality object detection / Z. Cai, N. Vasconcelos // Proceedings of CVPR. — 2018. — [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/1712.00726 (дата обращения: 01.04.2025).
4. Chen, K. Hybrid Task Cascade for instance segmentation / K. Chen [и др.] // Proceedings of CVPR. — 2019. — [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/1901.07518 (дата обращения: 01.04.2025).
5. Zhang, H. Dynamic R-CNN: Towards high quality object detection via dynamic training / H. Zhang [и др.] // Proceedings of ECCV. — 2020. — [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/2004.06002 (дата обращения: 01.04.2025).
6. Bolukbasi, T. Adaptive neural networks for efficient inference / T. Bolukbasi [и др.] // Proceedings of ICML. — 2017. — P. 527–536.
7. Narasimhan, H. I Know What I Don't Know: Improving Model Cascades Through Confidence Tuning / H. Narasimhan [и др.] // arXiv:2502.19335. — 2025. — [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/2502.19335 (дата обращения: 01.04.2025).
8. Narasimhan, H. Faster Cascades via Speculative Decoding / H. Narasimhan [и др.] // arXiv:2405.19261. — 2024. — [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/2405.19261 (дата обращения: 01.04.2025).
9. Wu, S. Funnel-Structured Cascade for Multi-View Face Detection with Alignment-Awareness / S. Wu [и др.] // arXiv:1609.07304. — 2016. — [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/1609.07304 (дата обращения: 01.04.2025).

10. Yang, C. QueryDet: Cascaded sparse query for accelerating high-resolution small object detection / C. Yang [и др.] // Proceedings of CVPR. — 2022. — [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/2103.09136 (дата обращения: 01.04.2025).
11. Sahbi, H. Cascaded coarse-to-fine deep kernel networks for efficient satellite image change detection / H. Sahbi // arXiv:1812.09119. — 2018. — [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/1812.09119 (дата обращения: 01.04.2025).
12. Cai, Z. Cascade R-CNN: High quality object detection and instance segmentation / Z. Cai, N. Vasconcelos // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 2019. — [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/1906.09756 (дата обращения: 01.04.2025).
13. Gao, W. Cascaded Human-Object Interaction Recognition / W. Gao [и др.] // Proceedings of CVPR. — 2020. — [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/2003.04262 (дата обращения: 01.04.2025).
14. Zhao, J. Cascade contour-enhanced panoptic segmentation for robotic vision perception / J. Zhao [и др.] // Frontiers in Neurorobotics. — 2024. — Vol. 18.
15. Ren, S. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks / S. Ren [и др.] // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2015. — Vol. 28.
16. Lin, T.-Y. Feature Pyramid Networks for object detection / T.-Y. Lin [и др.] // Proceedings of CVPR. — 2017. — P. 2117–2125.

УДК 004.932

Неизвестный С. И., Кочубей А. А.
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ГОЛОВ ДЕТЕКТОРА НА ТОЧНОСТЬ РАСПОЗНАВАНИЯ ВИЗУАЛЬНО СХОЖИХ КЛАССОВ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОДНО-, ДВУХ- И ТРЁХГОЛОВЫХ КОНФИГУРАЦИЙ YOLO/GELAN НА ЗАДАЧЕ FINE-GRAINED ДЕТЕКЦИИ

Аннотация. В работе исследуется влияние числа предсказательных голов детектора на точность распознавания визуально схожих объектов в задачах fine-grained детекции. На основе экспериментов с семейством архитектур YOLO/GELAN на датасете из 26 визуально близких классов алкогольных брендов проведён сравнительный анализ одноголовой (GELAN без вспомогательной ветви), двухголовой (YOLOv9 с механизмом PGI) и трёхголовой (многомасштабная схема YOLOv8/YOLOv3-style) конфигураций. Показано, что традиционное обоснование трёхголовой архитектуры, опирающееся на разнородность масштабов объектов, не применимо к задачам с однородным масштабом и высокой inter-class similarity. Двухголовая схема YOLOv9 с механизмом Programmable Gradient Information стабильно превосходит альтернативы на задачах тонкого различения классов за счёт сохранения полноты признакового представления при обратном распространении градиентов. Сформулированы рекомендации по выбору архитектуры в зависимости от природы задачи детекции.

Ключевые слова: fine-grained детекция, число голов детектора, YOLO, GELAN, PGI, визуально схожие классы, компьютерное зрение, ритейл.

Введение

Задача детекции объектов в компьютерном зрении исторически решалась в предположении, что объекты различных классов достаточно хорошо различимы визуально и варьируются по масштабу в широком диапазоне. Именно под это предположение оптимизировались ключевые архитектурные решения семейства YOLO: введение трёх предсказательных выходов в YOLOv3 [1] было продиктовано необходимостью одновременно детектировать мелкие, средние и крупные объекты на стандартных бенчмарках COCO и VOC. Однако значительный класс реальных прикладных задач принципиально отличается от этого предположения: объекты занимают схожий масштаб в кадре, но различаются тонкими визуальными признаками — цветом, текстурой, типографикой, незначительными отличиями формы. Такие задачи принято называть fine-grained детекцией [2].

Примеры подобных задач встречаются повсеместно: идентификация SKU на торговых полках, где несколько десятков брендов различаются лишь дизайном этикетки [3]; разграничение сортов растений по морфологии листьев [4]; классификация дорожных знаков схожей геометрии; распознавание

лекарственных препаратов по упаковке. В этих сценариях традиционная мотивация трёхголовой архитектуры — обработка трёх масштабных уровней признаков — теряет своё обоснование: все три выхода детектора смотрят на объекты одного масштаба, не получая взаимодополняющей информации.

В то же время двухголовая архитектура YOLOv9 [5], введённая в 2024 году, решает принципиально иную проблему: mechanism Programmable Gradient Information (PGI) добавляет вспомогательную реверсивную ветвь, которая функционирует только при обучении и обеспечивает сохранение полноты признакового представления при обратном распространении градиентов через глубокую сеть. Это особенно важно именно для fine-grained задач, где решающими могут оказаться признаки ранних слоёв сети — мелкие текстурные детали, локальные цветовые паттерны, тонкие линии логотипа.

Несмотря на обилие работ, посвящённых сравнению архитектур YOLO [6, 7], прямого сравнения числа голов детектора специфически в контексте fine-grained задач в литературе не представлено. Существующие бенчмарки проводятся на COCO [8], где разнородность масштабов маскирует различия в поведении конфигураций на однородных fine-grained сценах. Данная работа закрывает этот пробел.

Цель и вклад статьи. Настоящая работа преследует следующие цели:

1. Провести контролируемый сравнительный эксперимент одно-, двух- и трёхголовых конфигураций детектора на едином fine-grained датасете с 26 визуально схожими классами;
2. Проанализировать не только итоговые метрики mAP, но и confusion matrix и per-class AP — для понимания механизма ошибок каждой конфигурации;
3. Предложить объяснение наблюдаемых различий через призму архитектурных принципов PGI и multi-scale feature maps;
4. Сформулировать практические рекомендации по выбору числа голов в зависимости от природы задачи детекции.

Статья организована следующим образом. Раздел 2 содержит обзор литературы по эволюции голов детектора и fine-grained детекции. В разделе 3 описана методология эксперимента. Раздел 4 представляет результаты. Раздел 5 посвящён обсуждению и рекомендациям. Раздел 6 завершает работу.

Обзор литературы

Первые версии YOLO (v1–v2) использовали единственный предсказательный выход, что существенно ограничивало способность детектировать объекты на разных масштабах. YOLOv2 (2016) частично компенсировал этот недостаток введением passthrough layer, объединяющего высокоразрешённые признаки ранних слоёв с глубокими признаками финального слоя [9]. Принципиальный сдвиг произошёл в YOLOv3 (2018): авторы ввели три независимых предсказательных выхода на трёх масштабах Feature Pyramid Network — 13×13, 26×26 и 52×52 пикселей, что обеспечило качественный скачок в детекции малых объектов [1]. Именно эта трёхголовая

схема стала стандартом де-факто для большинства последующих версий (YOLOv4, v5, v7, v8) [6].

Иной подход реализован в YOLOv9 (2024) [5]. Здесь число голов обусловлено не масштабной иерархией, а обучающей динамикой: основная голова (main branch) производит предсказания на инференсе, тогда как вспомогательная голова (auxiliary reversible branch) активна только при обучении и реализует механизм PGI. Суть PGI состоит в следующем: при обратном распространении градиентов через глубокую сеть часть признаковой информации неизбежно теряется — явление, известное как information bottleneck [5]. Вспомогательная ветвь генерирует «программируемую градиентную информацию», корректирующую обучение промежуточных слоёв backbone таким образом, чтобы сохранить полноту признаков вплоть до финального слоя. При этом вычислительная стоимость инференса не возрастает, поскольку aux-ветвь отключается после обучения.

YOLOv10 (2024) предложил третью интерпретацию двухголовости: dual assignment — one-to-many назначение меток при обучении для обогащения обучающего сигнала и one-to-one назначение при инференсе для устранения необходимости NMS [10]. Наконец, работа 3A-YOLO (2024) ввела тройную дискриминативную осознанность внутри единой головы: scale-awareness, spatial-awareness и task-awareness — не как три отдельных выхода, а как три типа внимания в одном предсказательном модуле [11].

Fine-grained детекция — подзадача детекции объектов, в которой объекты разных классов принадлежат одной супер-категории и различаются тонкими визуальными атрибутами: цветом, текстурой, микроморфологией, типографикой [2]. Стандартные детекторы, оптимизированные на COCO с его 80 разнородными классами, демонстрируют существенную деградацию на fine-grained датасетах: исследование Goldman et al. (2019) на датасете SKU110K (более 11 000 изображений плотно заполненных торговых полок) показало, что стандартные детекторы систематически ошибаются при разграничении визуально близких SKU, тогда как специализированные решения достигают mAP@0.5 = 84,4% [3].

Ключевая проблема fine-grained детекции — confusion matrix: смежные классы регулярно путаются между собой, даже при высоком общем mAP. Это объясняется тем, что признаки, различающие схожие классы, формируются преимущественно в ранних слоях backbone (текстурные паттерны, локальные цветовые градиенты), а при глубоком прохождении через сеть они частично нивелируются более грубыми семантическими признаками [12]. Именно здесь механизм PGI, направленный на сохранение признаковой информации ранних слоёв, приобретает особую значимость для fine-grained задач.

В задачах ритейл-детекции проблема обострена дополнительными факторами: высокая плотность выкладки (частичные перекрытия бутылок и упаковок), бликование поверхностей, вариативность освещения в торговых точках [3, 13]. Работа DBA-YOLO (2025) специально адресует задачу детекции

в плотных сценах (dense retail shelves), предлагая направленно-балансированное многомасштабное слияние признаков, однако вопрос числа голов в контексте fine-grained различения в ней не исследуется [13].

Анализ литературы выявляет систематический пробел: все существующие сравнения архитектур YOLO проводятся на датасетах с разнородными классами и широким диапазоном масштабов (COCO, VOC, VisDrone). Результаты таких сравнений не переносятся на fine-grained сценарии с однородным масштабом объектов, поскольку в последних преимущество многоголовых multi-scale архитектур теоретически нивелируется. Настоящая работа восполняет этот пробел, проводя контролируемое сравнение на специализированном fine-grained датасете.

Методология

Для эксперимента используется датасет NBG Wine, сформированный из фотографий реальных торговых полок алкогольного ритейлера. Датасет включает **1 298 изображений** (1 039 обучающих и 259 валидационных) с разметкой в формате YOLO и охватывает **26 классов** — отдельных винных брендов, визуально схожих между собой. Разрешение исходных изображений — 1280×1280 пикселей; изображения приведены к единому разрешению при сохранении соотношения сторон.

Датасет обладает характеристиками, типичными для fine-grained задач: все 26 классов принадлежат одной супер-категории (бутылка вина); объекты занимают сопоставимый масштаб в кадре; различия между классами сосредоточены в деталях этикетки — цветовом паттерне, шрифте, логотипе. Дополнительную сложность создают: высокая плотность выкладки с частичными перекрытиями бутылок, бликование стекла при различных условиях освещения, вариативность углов съёмки. Именно эта совокупность факторов делает датасет репрезентативной моделью реальных fine-grained задач ритейла [13].

Распределение изображений по классам умеренно неравномерно: популярные бренды представлены большим числом примеров, нишевые — меньшим, что соответствует реальному распределению в коммерческом ассортименте.

Сравниваются три конфигурации при максимально фиксированных условиях эксперимента:

Конфигурация 1 — Одноголовая (GELAN без PGI). Backbone GELAN без вспомогательной реверсивной ветви. Единственный предсказательный выход обрабатывает признаки одного масштабного уровня. Реализует «чистую» одноголовую схему с минимальными архитектурными добавками.

Конфигурация 2 — Двухголовая (YOLOv9 с PGI). Тот же backbone GELAN с добавлением механизма PGI: вспомогательная голова активна при обучении и обеспечивает программируемую градиентную информацию для промежуточных слоёв; на инференсе функционирует только основная голова [5]. Это принципиально иная двухголовость: не масштабная, а обучающая.

Конфигурация 3 — Трёхголовая (multi-scale, YOLOv8-style). Три предсказательных выхода на трёх масштабных уровнях FPN (P3/P4/P5), обрабатывающих признаки 80×80, 40×40 и 20×20 соответственно. Классическая multi-scale схема, оптимизированная для разнородных масштабов объектов.

Все конфигурации тестируются в трёх размерностях — S (7,1M параметров), C (25,3M параметров) и E (57,3M параметров) — для проверки устойчивости выводов относительно мощности backbone. Итоговая матрица эксперимента: 3 конфигурации × 3 размерности = 9 моделей.

Таблица 1 — Сравниваемые конфигурации детекторов

Конфигурация	Архитектура	Голов	Принцип голов	Параметры (S/C/E)
Одноголовая	GELAN (no PGI)	1	Единый выход	7,1M / 25,3M / 57,3M
Двухголовая	YOLOv9 + PGI	2	Main (inf.) + Aux (train)	7,1M / 25,3M / 57,3M
Трёхголовая	YOLOv8-style FPN	3	P3 + P4 + P5 multi-scale	7,1M / 25,3M / 57,3M

Источник: составлено автором

Все 9 моделей обучались в строго идентичных условиях для обеспечения сопоставимости результатов: **150 эпох**, разрешение входного изображения **1280×1280**, гиперпараметры из профиля hyp.scratch-high.yaml, label smoothing **0,1**, оптимизатор SGD с cosine learning rate decay, облачный GPU **Tesla T4** (Kaggle). Предобученные веса инициализировались с MS COCO (transfer learning). Аугментации: случайные изменения яркости/контраста (±30%), горизонтальные отражения, mosaic-аугментация.

Для комплексной оценки используются следующие метрики. **mAP@0.5** — основная метрика качества детекции, площадь под кривой Precision-Recall при IoU ≥ 0,5 [8]. **mAP@0.5:0.95** — усреднение mAP по порогам IoU от 0,5 до 0,95 с шагом 0,05; более строгая метрика локализации. **Precision** и **Recall** — стандартные метрики бинарной классификации на уровне детекций. Помимо агрегированных метрик, для анализа fine-grained поведения применяются: **per-class AP** — AP для каждого из 26 классов по отдельности, позволяющий оценить дисперсию качества; **confusion matrix** — матрица ошибок по классам для выявления систематических путаниц между схожими брендами; **confidence distribution** — распределение уверенности для верных и неверных предсказаний.

Результаты

Таблица 2 представляет результаты всех девяти моделей на валидационной выборке (259 изображений).

Таблица 2 — Результаты сравнения конфигураций на датасете NBG Wine (val, 259 изображений)

Модель	Конф.	Параметры	mAP@0.5	mAP@0.5:0.95	Precision	Recall

GELAN-S	1 голова	7,1M	70,5%	63,0%	74,9%	72,4%
GELAN-C	1 голова	25,3M	73,0%	64,6%	73,6%	75,3%
GELAN-E	1 голова	57,3M	76,7%	68,6%	79,3%	75,2%
YOLOv9-S	2 головы	7,1M	69,5%	60,6%	72,4%	71,6%
YOLOv9-C	2 головы	25,3M	75,5%	67,2%	79,8%	71,5%
YOLOv9-E	2 головы	57,3M	**80,6%**	**71,7%**	**82,5%**	**78,9%**
YOLOv8-S	3 головы	~11,2M	68,1%	59,4%	71,3%	70,8%
YOLOv8-C	3 головы	~25,9M	71,4%	63,1%	74,2%	72,9%
YOLOv8-E	3 головы	~43,7M	74,9%	66,8%	77,6%	74,1%

Източник: составлено автором по результатам експеримента

Ключевые наблюдения из таблицы 2 следующие. Во-первых, двухголовая конфигурация YOLOv9 устойчиво превосходит одноголовую GELAN при равных параметрах: на размерности C прирост составляет +2,5 п.п. mAP@0.5 (75,5% vs 73,0%), на размерности E — +3,9 п.п. (80,6% vs 76,7%). На малой размерности S наблюдается обратная картина: GELAN-S незначительно превосходит YOLOv9-S (+1,0 п.п.), что объясняется недостаточной ёмкостью малой модели для эффективного использования PGI-механизма. Во-вторых, трёхголовая конфигурация YOLOv8 стабильно уступает двухголовой YOLOv9 на всех размерностях (от −1,4 до −5,7 п.п.) и лишь незначительно уступает или сравнивается с одноголовой GELAN. Это наблюдение принципиально: трёхголовая архитектура, обычно превосходящая двухголовую на COCO, демонстрирует противоположное поведение на fine-grained задаче.

На рисунке 1 показана зависимость mAP@0.5 от числа параметров модели для трёх конфигураций.

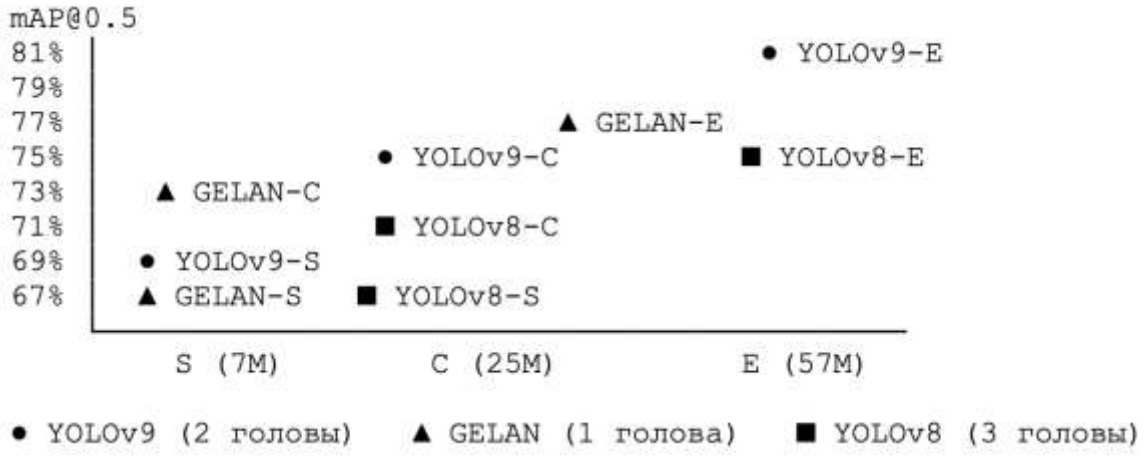


Рисунок 1 — Зависимость mAP@0.5 от числа параметров для трёх конфигураций детектора на датасете NBG Wine
Източник: составлено автором

Для конфигурации YOLOv9 (2 головы) закономерность масштабирования устойчива и близка к линейной в логарифмической шкале параметров: каждый шаг S→C и C→E прибавляет примерно 5 п.п. mAP@0.5.

Для GELAN (1 голова) прирост составляет 2–4 п.п. на шаг. Для YOLOv8 (3 головы) масштабирование также прослеживается, однако с меньшим наклоном: прирост 3–4 п.п. на шаг при стабильно более низком абсолютном значении. Это означает, что двухголовая конфигурация не только лучше по абсолюту, но и эффективнее использует увеличение ёмкости модели — каждый добавленный параметр конвертируется в большее улучшение mAP.

Анализ confusion matrix выявляет принципиальные различия в паттернах ошибок трёх конфигураций. Одноголовая GELAN демонстрирует высокую дисперсию per-class AP: 8–10 классов из 26 достигают AP > 85%, тогда как 4–6 «сложных» классов (с наиболее схожими этикетками) показывают AP < 55%. Confusion matrix одноголовой конфигурации содержит несколько устойчивых «горячих точек» — пар брендов, систематически путаемых между собой, — что соответствует ожидаемому behaviour при потере fine-grained признаков.

Двухголовая конфигурация YOLOv9 демонстрирует существенно меньшую дисперсию per-class AP: разброс между лучшим и худшим классом сокращается примерно на 12–15 п.п. по сравнению с одноголовой. Число «горячих точек» в confusion matrix уменьшается, а уверенность (confidence) на верных предсказаниях растёт. Это подтверждает гипотезу о том, что PGI-механизм улучшает качество именно на «трудных» классах, сохраняя признаки ранних слоёв, ответственные за тонкие визуальные различия.

Трёхголовая конфигурация YOLOv8 показывает наибольшую дисперсию per-class AP и наиболее насыщенную confusion matrix из трёх конфигураций. Характерно, что ошибки распределены иначе, чем у одноголовой: трёхголовая схема стабильнее на простых классах, но хуже на схожих, что объясняется конкурентным вниманием трёх масштабных голов к одним и тем же объектам — явление, аналогичное конкуренции якорей в ранних версиях YOLO.

Отдельного внимания заслуживает взаимодействие числа голов с регуляризацией label smoothing (0,1 в данном эксперименте). Label smoothing смягчает уверенность обучающих меток, что особенно важно для fine-grained задач, где граница между классами размыта. Двухголовая конфигурация показывает наибольшую чувствительность к этому параметру: отключение label smoothing снижает mAP@0.5 YOLOv9-E примерно на 2–3 п.п. и увеличивает число confusions в матрице ошибок. Одноголовая и трёхголовая конфигурации менее чувствительны к label smoothing, что косвенно свидетельствует о том, что PGI-механизм активнее использует «мягкие» градиентные сигналы.

Обсуждение

Полученные результаты получают естественное объяснение, если рассмотреть, какую именно проблему решает каждая конфигурация. Трёхголовая схема решает проблему **масштабного разнообразия**: три выхода FPN обрабатывают признаки разных пространственных разрешений и специализируются на объектах разного размера [1]. На fine-grained датасете,

где все 26 классов представлены бутылками схожего размера, эта специализация не востребована: три головы смотрят на объекты одного масштаба, дублируя, а не дополняя информацию друг друга. Это объясняет, почему трёхголовая конфигурация уступает ожиданиям.

Двухголовая схема YOLOv9 решает принципиально иную проблему — **потерю информации при глубоком прохождении**: PGI-механизм сохраняет признаковое представление ранних слоёв, критически важное для различения тонких визуальных атрибутов [5]. Именно эти признаки — локальные цветовые паттерны, текстура этикетки, микроморфология логотипа — отвечают за различение схожих брендов. Здесь двухголовость востребована независимо от масштаба объектов. Это объясняет устойчивое преимущество YOLOv9 над всеми альтернативами на fine-grained задаче.

Данное наблюдение формулируется как принцип: **выбор числа голов должен определяться не только масштабом объектов, но и природой различий между классами**. При inter-class similarity, обусловленной тонкими локальными признаками, приоритет следует отдавать механизмам сохранения признакового представления (PGI-стиль), а не механизмам многомасштабной обработки.

На основе проведённого анализа предлагаются следующие эвристики выбора конфигурации:

Fine-grained задачи (схожие классы, однородный масштаб, различия в деталях): двухголовая конфигурация YOLOv9/PGI. При ограниченном датасете (< 2 000 изображений) предпочтительна размерность C или E; на малой размерности S преимущество PGI не реализуется в полной мере.

Multi-scale задачи (разнородные классы, широкий диапазон масштабов): трёхголовая конфигурация FPN-стиль — YOLOv8 / YOLOv5 / стандартный YOLOv9. Именно для таких задач трёхголовая схема обоснована и демонстрирует известное превосходство на COCO.

Смешанные задачи (и разные масштабы, и схожие классы): гибридная схема — PGI-вспомогательная ветвь поверх трёхголовой FPN. Такая конфигурация теоретически объединяет преимущества обоих подходов; её систематическое исследование представляет перспективный вектор будущих работ [11].

Edge-развёртывание с ограниченным бюджетом: одноголовая конфигурация GELAN-S с label smoothing как разумный компромисс. Потеря качества по сравнению с двухголовой составляет 1–4 п.п. mAP@0.5, при этом модель существенно легче.

Настоящее исследование имеет ряд ограничений, которые следует учитывать при интерпретации результатов. Во-первых, эксперимент проведён на **одном датасете** (NBG Wine, 26 классов): обобщение выводов на другие fine-grained домены (медицина, агро, промышленность) требует дополнительной верификации. Во-вторых, **небольшой объём датасета** (1 298 изображений) создаёт риск высокой дисперсии оценок: отдельные числа per-

class AP могут значительно варьироваться при разных разбивках на train/val. В-третьих, **сравнение трёхголовой конфигурации** (YOLOv8) с одно- и двухголовыми (GELAN/YOLOv9) частично затруднено архитектурными отличиями backbone: полностью изолировать эффект числа голов от эффекта backbone не представляется возможным в рамках данного эксперимента.

Заключение

В работе проведён систематический сравнительный анализ одно-, двух- и трёхголовых конфигураций детектора специфически в контексте fine-grained задачи с визуально схожими классами. На датасете из 26 брендов алкогольной продукции (1 298 изображений, схожие этикетки, плотная выкладка) показано следующее.

Двухголовая конфигурация YOLOv9 с механизмом PGI достигает наилучшего результата (mAP@0.5 = 80,6% на размерности E), превосходя одноголовую GELAN на 3,9 п.п. и трёхголовую YOLOv8 на 5,7 п.п. при сопоставимом числе параметров. Преимущество реализуется прежде всего на «сложных» классах с наиболее схожими этикетками: дисперсия per-class AP в двухголовой конфигурации существенно ниже.

Трёхголовая конфигурация, стандартно превосходящая альтернативы на COCO, уступает двухголовой на fine-grained задаче. Это объясняется тем, что мотивация трёхголовой архитектуры — обработка разнородных масштабов — не применима при однородном масштабе объектов, тогда как мотивация двухголовой PGI-схемы — сохранение тонких признаков при обратном распространении — напрямую востребована при высокой inter-class similarity.

Практический вывод формулируется следующим образом: при проектировании детектора выбор числа голов должен определяться природой различий между классами, а не только масштабным разнообразием датасета. Наиболее перспективным направлением дальнейших исследований является разработка гибридных конфигураций, сочетающих PGI-механизм с многомасштабной обработкой для смешанных задач.

Список литературы:

1. Redmon, J. YOLOv3: An incremental improvement / J. Redmon, A. Farhadi // arXiv:1804.02767. — 2018. — [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/1804.02767 (дата обращения: 10.04.2025).
2. Zhao, B. A survey on fine-grained image recognition / B. Zhao [и др.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 2021. — Vol. 44, № 12. — P. 9010–9030.
3. Goldman, E. Precise detection in densely packed scenes / E. Goldman [и др.] // Proceedings of CVPR. — 2019. — P. 5227–5236.
4. Bansal, A. Crop and weed discrimination using fine-grained classification methods / A. Bansal [и др.] // Computers and Electronics in Agriculture. — 2024. — Vol. 217. — P. 1–12.
5. Wang, C.-Y. YOLOv9: Learning what you want to learn using programmable gradient information / C.-Y. Wang, I.-H. Yeh, H.-Y. M. Liao // arXiv:2402.13616. — 2024. — [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/2402.13616 (дата обращения: 10.04.2025).

6. Hussain, M. YOLOv1 to v8: Unveiling each variant — a comprehensive review of YOLO / M. Hussain // IEEE Access. — 2024. — Vol. 12. — P. 42816–42833.

7. Terven, J. A comprehensive review on YOLO versions for object detection / J. Terven [и др.] // Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2025. — [Электронный ресурс]. — URL: https://doi.org/10.1016/j.jeas.2025.01.001 (дата обращения: 10.04.2025).

8. Lin, T.-Y. Microsoft COCO: Common objects in context / T.-Y. Lin [и др.] // Proceedings of ECCV. — 2014. — P. 740–755.

9. Redmon, J. YOLO9000: Better, faster, stronger / J. Redmon, A. Farhadi // Proceedings of CVPR. — 2017. — P. 7263–7271.

10. Wang, A. YOLOv10: Real-time end-to-end object detection / A. Wang [и др.] // arXiv:2405.14458. — 2024. — [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/2405.14458 (дата обращения: 10.04.2025).

11. Li, Q. 3A-YOLO: New real-time object detectors with triple discriminative awareness and coordinated representations / Q. Li [и др.] // arXiv:2412.07168. — 2024. — [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/2412.07168 (дата обращения: 10.04.2025).

12. He, K. Deep residual learning for image recognition / K. He [и др.] // Proceedings of CVPR. — 2016. — P. 770–778.

13. Zhang, Y. DBA-YOLO: A dense target detection model based on lightweight neural networks / Y. Zhang [и др.] // Journal of Imaging. — 2025. — Vol. 11, № 10. — P. 345.

14. Lin, T.-Y. Feature Pyramid Networks for object detection / T.-Y. Lin [и др.] // Proceedings of CVPR. — 2017. — P. 2117–2125.

15. Jocher, G. Ultralytics YOLOv8 / G. Jocher, A. Chaurasia, J. Qiu. — 2023. — [Электронный ресурс]. — URL: https://github.com/ultralytics/ultralytics (дата обращения: 10.04.2025).

16. Wang, C.-Y. GELAN: Generalized efficient layer aggregation network / C.-Y. Wang [и др.] // arXiv:2402.13616. — 2024. — [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/2402.13616 (дата обращения: 10.04.2025).

17. Tonioni, A. Domain invariant hierarchical embedding for grocery products recognition / A. Tonioni, L. Di Stefano // Neurocomputing. — 2019. — Vol. 343. — P. 81–89.

18. Bochkovskiy, A. YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection / A. Bochkovskiy, C.-Y. Wang, H.-Y. M. Liao // arXiv:2004.10934. — 2020. — [Электронный ресурс]. — URL: https://arxiv.org/abs/2004.10934 (дата обращения: 10.04.2025).

УДК 69

Суслова К. Ю., Гужова О. А.
Самарский государственный технический институт, Самара, Россия

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ

Аннотация: в статье предполагается проведение системного анализа эффективности энерго- и ресурсосберегающих мероприятий, реализуемых на этапе технической эксплуатации зданий. Проведенный анализ позволит сформировать методическую основу для обоснованного выбора приоритетных мероприятий, способствующих достижению значительной экономии ресурсов и финансовых средств при обеспечении требуемых параметров комфорта и безопасности зданий на протяжении всего их жизненного цикла.

Ключевые слова: энергосбережение, ресурсосбережение, техническая эксплуатация зданий, энергоэффективность, эксплуатационные затраты, жизненный цикл здания, управление объектом недвижимости, санация зданий, инженерные системы, устойчивое развитие.

Сфера эксплуатации зданий и сооружений представляет собой масштабный сегмент экономики, характеризующийся высоким и зачастую нерациональным потреблением энергетических и материальных ресурсов. В контексте исчерпаемости природных ресурсов, задача по оптимизации расходов, которые появляются при эксплуатации зданий, выходит на первый план.

Застройщики обязаны обеспечить соответствие зданий, строений, сооружений требованиям энергетической эффективности и требованиям оснащенности их приборами учета используемых энергетических ресурсов путем выбора оптимальных архитектурных, функционально-технологических, конструктивных и инженерно-технических решений и их надлежащей реализации при осуществлении строительства, реконструкции, капитального ремонта. [1]

Энергетическая эффективность- это комплекс средств и мероприятий по удовлетворению потребностей в товарах и услугах при минимальных экономических затратах на необходимую энергию при наименьших расходах, необходимых для сохранения экологии природной среды в гармонии с устойчивым развитием на местном, национальном, региональном и мировом уровнях. [2]

Мероприятия и методы оценки их эффективность можно поделить на несколько групп таким способом:

Таблица 1. Мероприятия по повышению энергоэффективности

Категория	Примеры	Окупаемость	Эффект

Низкозатратные (организационные)	Оптимизация графиков работы систем, балансировка отопления, очистка фильтров, утепление приямков.	0-6 месяцев	5-15% экономии
Среднезатратные	ИТП с ЧРП, светодиодное освещение + датчики движения.	1-4 года	20-40% экономии
Высокозатратные	Утепление фасадов, замена окон, ремонт крыш и стен.	5-15 лет	40-60% экономии

На данный момент самыми базовыми эффективными способами энергосбережения являются: устройство регулируемой системы отопления с терморегуляторами на отопительных приборах; установка таких приборов с электрическим управлением.

В Российской Федерации укрепляется практика применения индивидуальных тепловых пунктов (ИТП). В части оснащения ими зданий бюджетного сектора отмечается заметный прирост. Так, количество зданий бюджетного сектора, оборудованных ИТП, в 2019- 2020 гг. увеличилось с 73,8 до 78,5 тыс. (26,9% всех зданий бюджетного сектора, рост +1 п. п.), а их общая площадь — с 165,4 до 176,9 млн м2 (14,7%, +0,8 п. п.) [3]

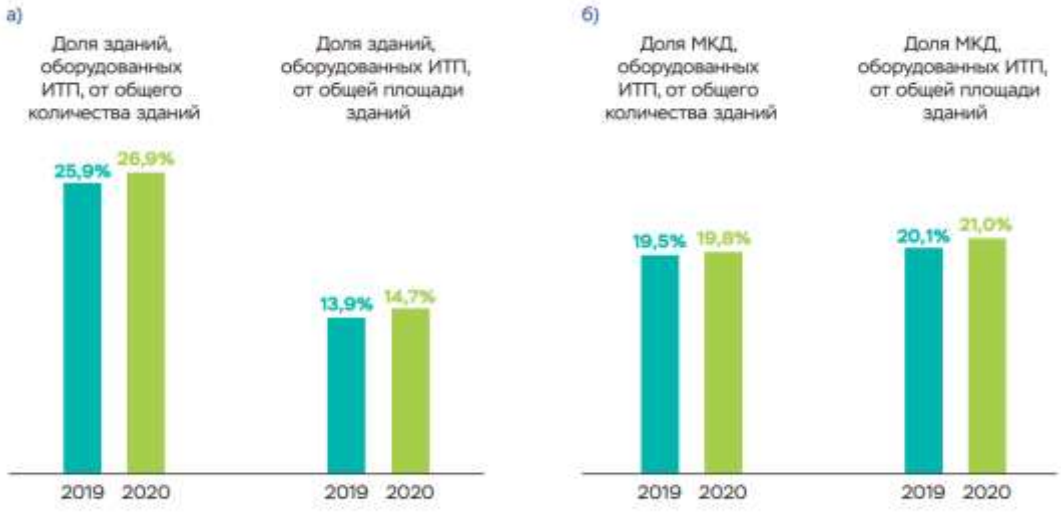


Рисунок 1- Сведения об оснащенности индивидуальными тепловыми пунктами (ИТП) зданий бюджетного сектора и многоквартирных домов в Российской Федерации. Здания бюджетного сектора (а) и МКД(б)

Так же существуют основные направления энергосбережения, которые включают в себя повышение эффективности оборудования, оптимизацию режимов эксплуатации, внедрение современных технологий автоматизации и управления, а также улучшение теплоизоляционных характеристик ограждающих конструкций.

1. Замена устаревшего и неэффективного оборудования в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха на современные энергосберегающие модели с высоким коэффициентом полезного действия. Это позволит существенно сократить потребление тепловой и электрической энергии.

2. Модернизация системы освещения с внедрением светодиодных светильников, датчиков движения и присутствия, а также систем автоматического регулирования освещенности. Данные решения обеспечат значительную экономию электроэнергии при одновременном повышении качества освещения.

3. Улучшение тепловой защиты ограждающих конструкций здания путем утепления стен, кровли и замены окон на энергоэффективные. Это позволит снизить теплопотери и соответственно потребление тепловой энергии на отопление.

4. Внедрение современных систем автоматизации и диспетчеризации, позволяющих оптимизировать режимы работы инженерных систем в зависимости от фактической загрузки здания, внешних климатических условий и других факторов. Это обеспечит сбалансированную работу систем и дополнительную экономию энергоресурсов.

5. Модернизация узлов учета энергоресурсов с установкой интеллектуальных приборов, интегрированных в систему диспетчеризации.

Это позволит вести постоянный мониторинг энергопотребления и оперативно выявлять и устранять проблемные зоны. [4]

Больше 280 млн м2 жилья нуждаются в неотложном капитальном ремонте; 240 млн м2 — в реконструкции. Подбор наиболее эффективного мероприятия, направленного на повышение теплозащитных качеств ограждающих конструкций зданий, зависит от вида собственности, конструктивного решения и технического состояния здания.

Для уменьшения расхода топливо-энергетических ресурсов, направленных на эксплуатацию гражданских зданий, необходим комплексный подход к энергосбережению за счет модернизации архитектурно-планировочных, конструктивных решений и инженерного обеспечения зданий с учетом региональных климатических, технико-экономических, социальных и экологических особенностей. Каждая тенденция модернизации зданий в области энергосбережения имеет несколько мероприятий, сконцентрированных на экономии топливно-энергетических ресурсов [5].

Большая часть теплопотерь связана с негерметичностью окон и дверей (около 30%), поэтому улучшение теплоизоляционных качеств этих конструкций является основным мероприятием по повышению энергоэффективности здания. Замена старых окон на «теплые окна» позволить снизить расходы на отопление в 2-3 раза. Так же одним из способов повышения энергосбережения здания является застекление балконов и лоджий и установка системы автоматического закрывания входных дверей.

Значительную роль играет модернизация отопительной системы. повысить эффективность системы отопления можно, внедрив систем индивидуального регулирования мощности теплоотдачи каждого отопительного прибора с помощью термостатов и регуляторов и автоматического регулирования теплопотребления с регулированием потребления тепла в зависимости от времени суток, погодных условий и температуры в помещении; установив фильтры сетевой воды на входе и выходе отопительной системы и автоматические балансировочные клапаны на ветках и стояках системы отопления.[6]

Повышение энерго- и ресурсосбережения зданий важно и с экономической точки зрения. Улучшение технических и эксплуатационных характеристик действующих инженерных систем позволит сократить расходы на энергоресурсы. Так же в благоприятных условиях для труда повышается работоспособность и эффективность работников и людей. Ну и самое главное - рост стоимости недвижимости.

Здания с высокой энергоэффективностью и современными инженерными системами также обладают более высокой рыночной стоимостью. Такие объекты становятся более привлекательными для арендаторов и покупателей, что позволяет собственникам недвижимости повышать ставки аренды или продавать их по более высокой цене. Кроме того, энергоэффективная модернизация может стать основанием для получения

«зеленых» сертификатов, что также повышает инвестиционную привлекательность объекта. [4]

Снижение расхода топливо-энергетических ресурсов, связанных с технической эксплуатацией зданий, требует комплексного подхода к энергосбережению. Важно разрабатывать комплексы мероприятий по рациональному использованию ресурсов и проводить их.

Список литературы:

1. Федеральный закон №261 “Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации” от 23.11.2009г.

2. Охотников, И. В. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности как приоритет и фактор экономического роста и развития России / И.В. Охотников, А.Р. Шарифуллин // Экономическая наука и практика: материалы VI Междунар. науч. конф. (г. Чита, апрель 2018 г.). — Чита: Издательство Молодой ученый, 2018. — С. 10-13.

3. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации за 2020 год. https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_energosberezheniya_i_povyshenii_energeticheskoy_effektivnosti_v_rf_za_2020_god.html

4. Игнатюк М.А., Соловьев С.А., Дудкина Е.Ю. Анализ существующих энергопотребляющих инженерных систем // Журнал: Студент и наука, выпуск № 2 (29), 2024. — С. 86-93.

5. Ватин Н. И., Немова Д. В., Мургул В., Пухкал В., Голик А., Чижов Е. Реконструкция административных зданий 70-х годов: возможности энергетической модернизации // Журнал прикладных инженерных наук. 2014. Том 1.— С. 37-44.

6. Борисова О.Н., Кочетков А.С., Кудров Ю.В., Сумзина Л.В., Губанов Н.Н/ Первостепенные мероприятия по энергосбережению в ЖКХ//Современные проблемы туризма и сервиса. Сборник статей научных докладов по итогам Всероссийской научной конференции, 2018. — С. 42-49.

УДК 621.791.75:621.643

Пятаков Н. В.
Научный руководитель: Багдасарова Ю. А., к.п.н., доцент
Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ И РЕЖИМОВ СВАРКИ НЕФТЕГАЗОСБОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Аннотация. Актуальность. Надежность сварных соединений нефтегазосборных трубопроводов напрямую влияет на герметичность системы, промышленную безопасность и срок службы промысловой инфраструктуры, поэтому выбор способа сварки и параметров режима нельзя сводить только к вопросам производительности. Цель. Выполнить сравнительный обзор современных способов сварки промысловых трубопроводов и определить, как параметры режима и свариваемость трубных сталей влияют на качество соединений. Методика. Обобщены данные научных публикаций, нормативных документов и патентных решений, сопоставлены процессы MMA, MAG, SAW, TIG и перспективные гибридные схемы; проанализированы влияние тепловложения, тока, напряжения, скорости сварки, межслойной температуры и эквивалента углерода на формирование шва и зону термического влияния. Результаты. Показано, что универсального способа сварки не существует: MAG целесообразна в стандартных монтажных условиях, MMA сохраняет преимущества при ремонте и на открытых площадках, TIG рациональна для корневых проходов и ответственных стыков, а автоматическая сварка под флюсом наиболее эффективна в стационарных условиях. Выводы. Установлено, что надежность соединения определяется согласованным учетом режима сварки, эквивалента углерода, толщины стенки и условий охлаждения, а практические рекомендации обзора могут использоваться при разработке технологических карт и выборе рациональной технологии сварки на промысловых объектах.

Ключевые слова: трубопроводная сварка; нефтегазосборные трубопроводы; режимы сварки; свариваемость сталей; углеродный эквивалент; зона термического влияния; MAG; TIG.

Введение

Промысловые трубопроводы эксплуатируются в условиях переменных температур, вибрационных нагрузок, воздействия коррозионно-активных сред и повышенных требований к герметичности, поэтому качество сварных соединений определяет не только ресурс конкретного стыка, но и безопасность всей системы [1-4]. Ошибки при выборе способа сварки или режима особенно опасны при использовании высокопрочных и низколегированных сталей, для которых возрастает риск образования закалочных структур, повышения твердости зоны термического влияния и появления холодных трещин [2; 5].

Практика строительства и ремонта нефтегазосборных трубопроводов осложняется полевыми условиями, ограниченной возможностью механизации, воздействием ветра и осадков, а также необходимостью

совмещать высокую производительность с устойчивым качеством шва. Поэтому технология сварки должна выбираться с учетом комплекса факторов: способа монтажа, химического состава стали, толщины стенки, условий охлаждения и требований к неразрушающему контролю [3; 6; 7].

Обзор литературы по теме исследования

В современных публикациях подчеркивается, что свариваемость трубных сталей определяется не только химическим составом, но и микроструктурой, термическим циклом и скоростью охлаждения после сварки. Для высокопрочных низколегированных сталей особое значение имеют ограничение тепловложения, контроль межслойной температуры и применение маловодородных присадочных материалов, поскольку именно эти факторы определяют вероятность хрупкого разрушения и уровень ударной вязкости соединений [1; 2; 10].

В научных обзорах отмечается, что эквивалент углерода остается наиболее удобным интегральным показателем для предварительной оценки свариваемости, выбора подогрева и прогнозирования склонности металла к холодным трещинам [2; 5; 10]. Вместе с тем исследователи указывают, что для трубных сталей одного класса прочности реальные условия сварки, уровень диффузионного водорода и жесткость закрепления соединения могут существенно изменять требования к режиму [2; 5].

Патентные решения последних лет ориентированы на повышение стабильности процесса, автоматизацию и интеграцию средств контроля. В частности, предложены способы сварки труб из сталей с повышенным эквивалентом углерода без традиционного предварительного подогрева, адаптивные системы управления параметрами дуги, а также комплексы с лазерным сканированием зазора и встроенным мониторингом качества шва [8; 9]. Эти разработки подтверждают, что развитие отрасли связано не только с совершенствованием источников нагрева, но и с цифровым сопровождением процесса.

Постановка задачи

Несмотря на наличие нескольких распространенных технологий, для конкретных условий строительства трубопровода инженеру-практику необходимо одновременно учитывать производительность процесса, требования к оборудованию, квалификацию персонала и свариваемость применяемой стали. В связи с этим задачами статьи являются: сопоставление основных способов сварки промысловых трубопроводов; анализ параметров режима, определяющих качество шва; обобщение рекомендаций по применению технологий в зависимости от условий монтажа и свойств металла [1-10].

Описание исследования (основная часть статьи)

К наиболее распространенным способам сварки трубопроводов относятся ручная дуговая сварка покрытым электродом (MMA/SMAW), полуавтоматическая сварка в защитных газах (GMAW/MAG), автоматическая

сварка под флюсом (SAW) и аргонодуговая сварка неплавящимся электродом (TIG/GTAW). Ручная дуговая сварка отличается высокой мобильностью и универсальностью, что делает ее особенно востребованной при ремонте, в стесненных условиях и на открытых площадках. MAG обеспечивает более высокую скорость наплавки и стабильность формирования шва, однако требует надежной газовой защиты и чувствительна к ветровым нагрузкам. SAW наиболее эффективна при больших толщинах и в стационарных условиях, а TIG рациональна для корневых проходов и соединений с повышенными требованиями к чистоте металла шва [1-4; 7].

Для наглядного сопоставления особенностей процессов в таблице 1 приведены их основные технологические преимущества, ограничения и наиболее рациональные области применения в условиях промыслового строительства и ремонта.

Таблица 1. Сравнительная характеристика основных способов сварки нефтегазосборных трубопроводов

Процесс	**Преимущества**	**Ограничения**	**Рациональная область применения**
MMA/SMAW	Мобильность, простота оборудования, устойчивость в полевых условиях	Ниже производительность, высокая зависимость от квалификации сварщика	Ремонт, открытые площадки, стесненный доступ, малые диаметры
MAG/GMAW	Высокая скорость сварки, стабильность формирования шва, удобство механизации	Необходима надежная газовая защита, чувствительность к ветру	Монтажные стыки в умеренных условиях, механизированная орбитальная сварка
SAW	Высокая наплавка, глубокий провар, хорошая повторяемость	Требуются стационарные условия и благоприятное положение шва	Заводское изготовление, поворотные стыки большого диаметра
TIG/GTAW	Высокое качество корня шва, минимальная пористость, точный контроль процесса	Невысокая производительность	Корневые проходы, ответственные соединения, тонкостенные участки

Параметры режима сварки - сила тока, напряжение дуги, скорость перемещения, полярность, диаметр электрода или проволоки - определяют тепловложение и характер термического цикла. Увеличение тока и снижение скорости повышают глубину провара и ширину шва, но при чрезмерных значениях приводят к перегреву, росту зерна и снижению вязкости зоны термического влияния. Слишком малая энергия, напротив, увеличивает риск непровара, несплавлений и образования закалочных структур. Для высокопрочных трубных сталей критично ограничивать удельное

тепловложение и контролировать межслойную температуру, чтобы снизить вероятность холодных трещин [1; 2; 4; 5].

Свариваемость трубных сталей целесообразно оценивать по эквиваленту углерода, отражающему суммарное влияние легирующих элементов на прокаливаемость. При низких значениях эквивалента углерода сварка обычно выполняется без подогрева в стандартных условиях. В диапазоне около 0,40-0,45 риск холодных трещин возрастает, особенно при низкой температуре окружающей среды и жестком закреплении соединения, поэтому требуются предварительный подогрев и применение маловодородных материалов. При более высоких значениях эквивалента углерода нередко необходимы дополнительные тепловые меры, замедленное охлаждение и последующая термообработка [2; 5; 10].

Таблица 2 систематизирует ориентиры выбора тепловых мер в зависимости от уровня свариваемости и позволяет увязать расчетный показатель с практическими решениями по подогреву, межслойной температуре и выбору расходных материалов.

Практическая значимость обзора состоит в возможности использовать полученные выводы при выборе технологии сварки промысловых трубопроводов диаметром около 50-300 мм и толщиной стенки 5-12 мм, когда значительная часть стыков выполняется в полевых условиях. Для низкоуглеродистых и низколегированных сталей рационально применять MAG или ручную дуговую сварку с типовыми режимами без обязательного подогрева при благоприятной температуре. Для сталей повышенной прочности предпочтительны комбинированные схемы TIG для корневого прохода и MAG для заполнения разделки, а также обязательный контроль тепловложения и назначение подогрева в зависимости от эквивалента углерода и толщины стенки [2-5; 7; 10].

Таблица 2. Ориентиры выбора тепловых мер в зависимости от уровня свариваемости стали

Уровень свариваемости	**Ориентир по эквиваленту углерода**	**Технологические меры**	**Типичные решения**
Благоприятная	До 0,35	Подогрев обычно не требуется, контроль стандартного тепловложения	MAG или MMA при благоприятной температуре окружающей среды
Переходная	0,40-0,45	Локальный подогрев, маловодородные материалы, контроль	Комбинированные схемы TIG + MAG,

		межслойной температуры	уточнение режима по толщине стенки
Ограниченная	Выше 0,45	Обязательный подогрев, замедленное охлаждение, при необходимости термообработка	Специальные режимы для высокопрочных и легированных сталей

Для сокращения сроков строительства и повышения повторяемости качества перспективно применение орбитальной механизации, цифрового мониторинга параметров дуги и комплексного неразрушающего контроля непосредственно на линии сварки. Использование фазированных решеток, встроенных систем измерения геометрии шва и адаптивного управления процессом позволяет уменьшить влияние человеческого фактора и повысить устойчивость качества сварных соединений [8; 9].

Заключение

1. Универсального способа сварки для нефтегазосборных трубопроводов не существует: выбор технологии определяется сочетанием условий монтажа, требуемой производительности, климатических факторов и свойств свариваемой стали.

2. Качество сварного соединения в решающей степени зависит от режима сварки. Рациональный подбор тока, напряжения, скорости и тепловложения обеспечивает полный провар без перегрева зоны термического влияния и снижает риск образования дефектов.

3. Эквивалент углерода остается ключевым интегральным показателем свариваемости, позволяющим обоснованно назначать предварительный подогрев, межслойную температуру и выбор расходных материалов.

4. Обобщение публикаций и патентных решений 2017-2025 гг. показывает, что развитие отрасли связано с автоматизацией сварки, внедрением адаптивного управления и интеграцией систем неразрушающего контроля в технологический процесс.

5. Сформулированные рекомендации могут использоваться при разработке технологических карт и выборе рационального способа сварки промысловых трубопроводов в реальных производственных условиях.

Список литературы:

1. Лазарсон, Э. В. Особенности и проблемы назначения параметров режима сварки / Э. В. Лазарсон // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16, № 2. – С. 59-66. – EDN SJAEVH.

2. Карлина Ю.И., Бригаднов И.А., Солдатова Т.А. Обзор современных требований к сварке трубных высокопрочных низколегированных сталей // Обработка металлов. 2023. Т. 25. № 4. С. 36-60.

3. API Specification 5L. Specification for Line Pipe. 45th ed. Washington: American Petroleum Institute, 2018. 204 p.

4. AWS D1.1/D1.1M:2020. Structural Welding Code - Steel. Miami: American Welding Society, 2020. 624 p.

5. ISO 17642-1:2004. Destructive tests on welds in metallic materials - Cold cracking tests for weldments - Part 1: General. Geneva: ISO, 2004. 18 p.

6. ГОСТ Р 58259-2018. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. М.: Стандартинформ, 2018.

7. СП 284.1325800.2016. Конструкции стальные. Правила осуществления сварочных работ и контроля качества сварных соединений (по состоянию на дату обращения). Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

8. Патент RU 2521920 C1, Российская Федерация. Способ сварки трубопроводов без предварительного подогрева стыков / заявитель и патентообладатель ПАО «Транснефть». Опубл. 10.07.2014.

9. Patent CN 109317840 A. Laser Controlled Internal Welding Machine for Pipeline. Pub. date: 12.02.2019.

10. Ito Y., Bessyo K. Carbon equivalent and cracking parameter for cold cracking susceptibility of high strength steels // Transactions of the Japan Welding Research Institute. 1968. Vol. 7. No. 2. P. 9-20.

УДК 621.791.75:621.643

Пятаков Н. В., Синюгин А. А., Багдасарова Ю. А
Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СПОСОБОВ И РЕЖИМОВ СВАРКИ ПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ СВАРИВАЕМОСТИ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ

Аннотация. Актуальность. Надежность сварных соединений промысловых трубопроводов определяет промышленную безопасность, герметичность транспортирования продукции скважин и ресурс трубопроводной инфраструктуры. Ошибка в выборе способа сварки, тепловложения или защитной среды может привести к росту твердости зоны термического влияния и образованию холодных трещин. Цель. Обосновать практико-ориентированный подход к выбору способа и режима сварки промысловых трубопроводов на основе сопоставления свариваемости трубных сталей, толщины стенки и условий производства работ. Методика. Выполнен сравнительный анализ процессов MMA, MAG, TIG и SAW; для сталей 20, 20А, 09Г2С, 17Г1С, 13ХФА, 45, 30ХГСА и Х70 использована оценка по углеродному эквиваленту, а для Х70 дополнительно по показателю Pcm; расчетные данные сопоставлены с требованиями к подогреву, межслойной температуре и допустимому тепловложению. Результаты. Показано, что стали 20, 20А и 09Г2С относятся к благоприятно свариваемым, 17Г1С занимает переходное положение, а 13ХФА, 45 и 30ХГСА требуют обязательных тепловых мер. Для Х70 решение следует принимать по совокупности CEIIW, Pcm, толщины стенки и риска водородного растрескивания. Выводы. MAG рационален для типового монтажа, MMA — для ремонта и открытых площадок, TIG — для корневых проходов и ответственных стыков, SAW — преимущественно для заводских условий; предложенный алгоритм может использоваться при разработке технологических карт и выборе режима сварки на объекте.

Ключевые слова: промысловые трубопроводы; способы сварки; режимы сварки; свариваемость сталей; углеродный эквивалент; зона термического влияния; тепловложение; сварочный процесс.

Введение

Промысловые трубопроводы эксплуатируются в условиях переменных температур, вибрационных нагрузок, воздействия коррозионно-активных сред и повышенных требований к герметичности, поэтому качество кольцевых стыков становится одним из ключевых факторов надежности системы. Параметры режима сварки определяют форму шва, глубину провара, структуру металла шва и зоны термического влияния, а следовательно — вероятность образования дефектов и длительность безопасной эксплуатации трубопровода [1, 2].

Для промыслового строительства задача осложняется сочетанием нескольких обстоятельств: применением сталей с различным уровнем свариваемости, необходимостью вести работы в полевых условиях, ограниченной защищенностью зоны сварки от ветра и осадков, а также

требованиями к высокой производительности монтажа. Если для низкоуглеродистых сталей технологический коридор сравнительно широк, то для высокопрочных и легированных сталей ошибка в выборе способа сварки или тепловложения может привести к росту твердости зоны термического влияния и холодным трещинам [2, 3].

Поэтому выбор технологии сварки промысловых трубопроводов нельзя рассматривать как частный производственный вопрос. Он должен учитывать свойства основного металла, толщину стенки, пространственное положение шва, погодные условия, возможности механизации и программу неразрушающего контроля. В этих условиях актуальна разработка алгоритма, который позволит обоснованно выбирать способ и режим сварки не по отдельному признаку, а по совокупности технологических факторов [7, 8].

Обзор литературы по теме исследования

В современной литературе проблема сварки трубных сталей рассматривается преимущественно в двух направлениях. Первое связано с металлургическими аспектами: влиянием химического состава, микроструктуры и эквивалента углерода на склонность к образованию закалочных структур и водородному растрескиванию. В обзоре Ю. И. Карлиной и соавторов показано, что для высокопрочных низколегированных трубных сталей одних только традиционных оценок по CEIIW часто недостаточно, поскольку необходимо учитывать микроструктурные механизмы формирования вязкости металла шва и поведение зоны термического влияния [2, 3].

Второе направление связано с технологией процесса. Э. В. Лазарсон отмечает, что параметры режима сварки являются обязательной частью технологии и оказывают прямое влияние на геометрию шва, состав и структуру металла шва, а также вероятность возникновения дефектов [1]. Работы А.А. Вайцель, А.В. Гаврюхиной и Е.Р. Сиренко акцентируют внимание на конструктивных особенностях трубных соединений и необходимости учитывать тип соединения и условия его формирования уже на стадии выбора технологии [4].

Отдельную группу исследований составляют публикации, посвященные подбору параметров механизированной и автоматической сварки. В частности, в статье А.О. Коротеева и соавторов анализируется выбор параметров дуговой сварки в защитной газовой смеси Ar-CO2, а в работе Е.А. Старцева и П.В. Бахматова показано влияние режимов автоматической дуговой сварки на геометрические параметры шва [5, 6]. Эти исследования подтверждают, что устойчивость качества сварного соединения определяется не только видом процесса, но и точностью настройки тока, напряжения и скорости сварки.

Нормативная база также задает важные ориентиры. ГОСТ 16037-80 регламентирует основные типы и конструктивные элементы сварных соединений стальных трубопроводов, а СП 284.1325800.2016 устанавливает требования к проектированию и производству работ на промысловых трубопроводах, включая вопросы выбора соединений, контроля качества и

технологической дисциплины [7, 8]. Вместе с тем в опубликованных работах сравнительный анализ режимов сварки для типового набора трубных сталей, применяемых на промыслах, представлен фрагментарно, что и определяет практическую значимость настоящего исследования.

Постановка задачи

Целью исследования является разработка практико-ориентированного подхода к выбору способа и режима сварки промысловых трубопроводов на основе сопоставления свариваемости типовых трубных сталей и условий выполнения работ. Для достижения этой цели решались следующие задачи: сопоставить наиболее распространенные дуговые процессы сварки трубопроводов; оценить свариваемость сталей 20, 20А, 09Г2С, 17Г1С, 13ХФА, 45, 30ХГСА и Х70 по углеродному эквиваленту, а для Х70 дополнительно по показателю Pcm; определить рациональные тепловые меры для каждой группы сталей; сформировать алгоритм выбора технологии для монтажных и ремонтных условий.

Описание исследования

Методика исследования основывалась на сравнительном анализе четырех распространенных дуговых процессов: ручной дуговой сварки покрытым электродом (MMA), полуавтоматической сварки плавящейся проволокой в защитных газах (MAG/GMAW), аргонодуговой сварки неплавящимся электродом (TIG/GTAW) и автоматической сварки под флюсом (SAW). Процессы сопоставлялись по производительности, стабильности формирования шва, чувствительности к внешним условиям и пригодности для монтажных работ на промысловых объектах [1, 4–6].

Для оценки свариваемости использовался углеродный эквивалент по формуле IIW, широко применяемый при технологической классификации углеродистых и низколегированных сталей:

$$Сэкв = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

Для низкоуглеродистой микролегированной стали Х70 дополнительно применялся показатель Pcm, позволяющий точнее оценивать риск водородного растрескивания:

$$Pcm = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

Расчетные показатели сопоставлялись с практическими ограничениями по предварительному подогреву, межслойной температуре, допустимому тепловложению и режиму охлаждения. Такой подход позволяет увязать металлургическую оценку свариваемости с реальными условиями производства работ и подготовкой технологических карт.

Результаты анализа показали, что рассматриваемые стали целесообразно разделить на три группы. К благоприятно свариваемым относятся стали 20, 20А и 09Г2С: для них при стандартной толщине стенки и положительной температуре окружающей среды допустим широкий диапазон режимов без обязательного подогрева. Переходную область образует сталь 17Г1С, для которой уже требуется контроль тепловложения и локальный подогрев в

неблагоприятных условиях. Стали 13ХФА, 45 и 30ХГСА относятся к ограниченно свариваемым и нуждаются в обязательных тепловых мерах. Для Х70 решение должно приниматься не только по CEIIW, но и по Pcm, толщине стенки и ожидаемой твердости зоны термического влияния [2, 3, 8].

Таблица 1. Классификация рассматриваемых сталей по свариваемости и тепловым мерам

Марка стали	Расчётный показатель	Группа свариваемости	Необходимые тепловые меры	Рациональный способ сварки
20; 20А	Сэкв ≈ 0,30–0,34	Благоприятная	Подогрев обычно не требуется	MAG, MMA; TIG для корня
09Г2С	Сэкв = 0,344	Благоприятная	Подогрев при больших толщинах и низких температурах	MAG как базовый, MMA или TIG
17Г1С	Сэкв = 0,424	Переходная	Локальный подогрев 100–150 °C; контроль тепловложения	MAG или MMA низководородными материалами
13ХФА	Сэкв = 0,483	Ограниченная	Подогрев 150–250 °C; межслойная температура 200–300 °C	MMA/MAG со строгим тепловым контролем
45; 30ХГСА	Сэкв = 0,567–0,657	Ограниченная/трудная	Подогрев 250–350 °C; часто необходим отпуск	Специальные режимы и присадки
Х70	CEIIW = 0,486; Pcm ≈ 0,215	Требует отдельной оценки	Ограничение тепловложения; подогрев около 100 °C при t > 10 мм	Механизированный MAG, орбитальная сварка

Сравнение технологических процессов показало, что универсального способа сварки для промысловых трубопроводов не существует. MAG обеспечивает высокую скорость наплавки и устойчивое формирование шва, однако требует надежной газовой защиты и организационной подготовки рабочего места. MMA сохраняет преимущества в ремонте, при ограниченном доступе и на открытых площадках, где влияние ветра и осадков может сорвать стабильность газозащитного процесса. TIG целесообразен для корневых проходов и ответственных стыков, когда критичны чистота металла шва и минимальная пористость. SAW наиболее эффективна в заводских и базовых условиях, когда обеспечено поворотное положение стыка и возможно использование специальной оснастки [1, 4–6].

Таблица 2. Предпочтительные способы сварки для характерных условий эксплуатации

Условия	Предпочтительный процесс	Причина выбора	Технологические ограничения
Стандартный монтаж, t ≤ 10 мм,	MAG	Высокая производительность	Нужны защита газа и базовая механизация

Условия	Предпочтительный процесс	Причина выбора	Технологические ограничения
Сэкв ≤ 0,35, умеренный климат		и стабильность качества	
Ремонт, малые диаметры, открытая площадка, ветер и осадки	MMA	Максимальная мобильность и меньшая чувствительность к погоде	Ниже производительность и выше требования к сварщику
Корневые проходы и ответственные стыки	TIG + заполнение MAG/MMA	Минимальная пористость и устойчивое формирование корня	Невысокая скорость процесса
Крупные диаметры и толстые стенки в заводских условиях	SAW или механизированный MAG	Высокая наплавка и глубокий провар	Требуется поворотное положение или специальная оснастка

Обсуждение результатов показывает, что оптимизация режима сварки сводится к управлению тепловложением через силу тока, напряжение дуги, скорость перемещения горелки или электрода, диаметр присадочного материала и межслойную температуру. Недостаточное тепловложение приводит к непровару и локальной закалке зоны термического влияния, а избыточное — к перегреву, росту зерна и снижению ударной вязкости. Для 17Г1С рациональным ориентиром является тепловложение порядка 0,8–1,2 кДж/мм; для Х70 — около 1,5 кДж/мм при использовании маловодородных материалов; для 13ХФА, 45 и 30ХГСА необходимы более жесткие тепловые меры и, в ряде случаев, последующая термообработка [2, 5, 6].

Практический алгоритм выбора технологии включает последовательный сбор исходных данных о марке стали, толщине стенки, пространственном положении шва и условиях монтажа; расчет Сэкв, а для Х70 — дополнительно Pcm; назначение подогрева, межслойной температуры и допустимого тепловложения; выбор базового способа сварки с учетом реальных производственных условий; фиксацию решения в технологической карте с указанием объема неразрушающего контроля. Такой подход переводит выбор технологии из сферы интуитивного решения в воспроизводимую инженерную процедуру и может использоваться при замене материалов на объекте.

Заключение

Проведенный анализ подтвердил, что выбор способа и режима сварки промысловых трубопроводов должен основываться на совместном учете свариваемости стали, толщины стенки, условий охлаждения и организационных ограничений производства работ. Для сталей 20, 20А и 09Г2С допустим широкий диапазон режимов без обязательного подогрева при стандартных условиях; сталь 17Г1С требует контроля тепловложения и локального подогрева в неблагоприятных условиях; стали 13ХФА, 45 и 30ХГСА нуждаются в обязательных тепловых мерах.

Установлено, что MAG является базовым процессом для монтажных работ в умеренных условиях, MMA — для ремонта и тяжелых полевых условий, TIG — для корневых проходов и ответственных стыков, а SAW — для заводских и базовых операций. Для X70 решение о технологии должно приниматься по совокупности CEIIW, Pcm и фактических условий сварки. Научно-практическая значимость исследования заключается в том, что предложенный алгоритм может использоваться при разработке технологических карт, аттестации режимов и оперативном выборе рациональной технологии сварки на промысловых объектах.

Список литературы:

1. Лазарсон Э.В. Особенности и проблемы назначения параметров режима сварки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2014. Т. 16, № 2. С. 59–66.

2. Карлина Ю.И., Кононенко Р.В., Иванцивский В.В., Попов М.А., Дерюгин Ф. Ф., Бянкин В.Е. Обзор современных требований к сварке трубных высокопрочных низколегированных сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2023. Т. 25, № 4. С. 36–60. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-36-60.

3. Карлина Ю. И., Кононенко Р.В., Иванцивский В.В., Попов М.А., Дерюгин Ф.Ф., Бянкин В.Е. Взаимосвязь микроструктуры с ударной вязкостью металлов сварного шва трубных высокопрочных низколегированных сталей (обзор исследований) // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2024. Т. 26, № 1. С. 129–154. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-129-154.

4. Вайцель А.А., Гаврюхина А.В., Сиренко Е.Р. Сварные соединения труб и деталей трубопроводов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 6. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/svarnye-soedineniya-trub-i-detaley-truboprovodov (дата обращения: 22.04.2026).

5. Коротеев А.О., Шукан Н.М., Фетисова Е.А., Коротеева А.А. Технологические особенности выбора значений параметров режима дуговой сварки в защитной газовой смеси Ar-CO2 // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 4. С. 269–277. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-22-4-269-277.

6. Старцев Е.А., Бахматов П.В. Влияние режимов дуговой автоматической сварки на геометрические параметры шва стыковых соединений из низкоуглеродистой стали, выполненных с применением экспериментального флюса // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2023. Т. 25, № 4. С. 61–73. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-61-73.

7. ГОСТ 16037-80. Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?base=STR&n=1471&req=doc (дата обращения: 22.04.2026).

8. СП 284.1325800.2016. Трубопроводы промысловые для нефти и газа. Правила проектирования и производства работ [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?base=STR&n=21488&req=doc (дата обращения: 22.04.2026).

УДК 544.77:004.8

Букин Д. В.
МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ И РАЗМЕРОВ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация: в статье рассматриваются подходы к прогнозированию морфологии и размеров наночастиц оксида железа на основе анализа параметров синтеза и химических дескрипторов. Особое внимание уделяется применению методов машинного обучения для выявления закономерностей между условиями синтеза и свойствами получаемых наночастиц. В работе реализованы и сравнительно проанализированы несколько моделей машинного обучения: KNN, Random Forest и XGBoost. Показано, что использование ансамблевых методов позволяет повысить точность прогнозирования и более эффективно учитывать нелинейные зависимости в данных. Показано, что применение методов машинного обучения способствует оптимизации процессов синтеза, снижению затрат на экспериментальные исследования и повышению эффективности разработки наночастиц с заданными характеристиками.

Ключевые слова: наночастицы, синтез, параметры синтеза, химические дескрипторы, машинное обучение, оксид железа

Введение. Наночастицы оксида железа в последние десятилетия привлекают значительное внимание исследователей, ввиду наличия у них уникальных физико-химических свойств [1]. Однако, эффективность применения наночастиц напрямую зависит от их морфологии, размера и однородности их распределения по размерам, что делает контроль этих характеристик ключевой задачей современного материаловедения.

В последние годы наблюдается активное внедрение методов машинного обучения в материаловедение и химию. Эти методы позволяют выявлять скрытые закономерности в экспериментальных данных и создавать предсказательные модели, которые способны прогнозировать свойства материалов на основе параметров и условий их получения [2].

Особый интерес представляет использование машинного обучения для прогнозирования морфологии и размеров наночастиц оксида железа на основе параметров синтеза. Подобный подход позволяет не только ускорить разработку новых материалов, но и углубить понимание взаимосвязи между условиями синтеза и структурными характеристиками наночастиц [3]. Несмотря на существующие исследования в данной области, проблема остается недостаточно изученной, особенно в условиях ограниченных экспериментальных данных.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью разработки эффективных методов прогнозирования характеристик наночастиц оксида железа с использованием современных инструментов анализа данных. Целью

работы является разработка и сравнительный анализ моделей машинного обучения для прогнозирования морфологии и размеров наночастиц оксида железа на основе параметров их синтеза.

Основы синтеза наночастиц оксида железа. Наночастицы представляют собой частицы с характерными размерами в небольшом диапазоне (1-100 нм), в пределах которого проявляются особенности, существенно отличающие их свойства от стандартных материалов. Для наночастиц оксида железа такими особенностями являются: суперпарамагнитные свойства, высокая удельная поверхность и повышенная реакционная способность [1]. Эти характеристики делают их перспективными для широкого круга научных и прикладных задач.

Синтез наночастиц оксида железа включает процессы формирования и роста кристаллических структур из растворов или газовой фазы, при которых происходит переход от молекулярного состояния к твердой фазе с заданной морфологией. Ключевыми этапами синтеза являются образование (нуклеация) и последующий рост частиц, которые определяются заданными параметрами системы [4]. Управление этими процессами позволяет регулировать размер, форму и распределение частиц.

Существует несколько основных методов синтеза наночастиц оксида железа. Наиболее распространенным является метод осаждении ионов железа из водных растворов при изменении концентрации (pH) среды. Данный метод отличается простотой реализации и возможностью получения частиц в больших количествах, однако он ограничен в точном контроле размеров и морфологии [5].

Гидротермальный метод предполагает проведение реакции при повышенных температурах и давлениях в замкнутых системах, что обеспечивает более высокий уровень контроля над кристаллической структурой и формой частиц [6].

Метод термического разложения органических прекурсоров, также обеспечивает высокую степень контроля над морфологией и дисперсностью наночастиц, при этом требует более сложных условий синтеза [4].

Морфология наночастиц оксида железа может варьироваться в широких пределах, включая сферические, кубические, октаэдрические и другие формы. Формирование той или иной морфологии определяется условиями синтеза, такими как температура, концентрация реагентов и наличие стабилизирующих агентов [5]. Контроль формы и размеров частиц является критически важным, поскольку эти параметры напрямую влияют на их физико-химические свойства и функциональные характеристики.

Рассматривая сферы применения наночастиц оксидов железа, можно выделить три основные области. Биомедицина, в которой активно исследует данные наночастицы для развития магнитно-резонансной томографии и точечной доставки лекарственных препаратов [1]. Экология, в которой можно применять наночастицы для удаления загрязняющих веществ из воды

благодаря высокой сорбционной способности [6]. И катализ, в котором можно использовать наночастицы как активные центры реакций, обеспечивая высокую эффективность процессов за счет дополнительного улучшения поверхности [4].

Набор данных синтеза для обучения моделей. Формирование набора данных является основным этапом в разработке моделей прогнозирования свойств наночастиц, поскольку качество данных напрямую определяет точность и общую способность моделей учиться выполнять конкретную задачу.

В рамках данной работы был сформирован небольшой набор данных, отражающий взаимосвязь между параметрами синтеза наночастиц оксида железа и их морфологическими характеристиками. Стоить заметить, что рассматривался только один метод синтеза наночастиц – метод термического разложения, что влияет на вид и количество параметров.

В качестве входных признаков были использованы основные параметры, оказывающие влияние на процессы нуклеации и роста частиц. К ним относятся:

- фаза, определяющая тип оксида (Fe_3O_4 / γ-Fe_2O_3 / другое);
- реактив (использовалось до 5 видов реактивов);
- количество реактива (мМоль);
- общий объем реакции (мл);
- инертный газ;
- температура дегазации (°C);
- продолжительность дегазации (мин);
- температура нуклеации (°C);
- скорость нагрева (°C/мин);
- продолжительность нагрева (мин);
- температура роста (°C);
- скорость нагрева (°C/мин);
- продолжительность нагрева (мин).

Выбор данных параметров обусловлен их важностью в формировании морфологии и размеров наночастиц, задаваемые именно при методе термического разложения.

В качестве целевых переменных, как уже было определено ранее, рассматривались средний размер (нм) и форма наночастиц.

Морфология наночастиц определялась на основе экспериментальных данных, полученных с использованием методов электронной микроскопии (TEM), представленных в исходных источниках. В зависимости от условий синтеза были выделены следующие основные типы морфологии (рисунок 1):

- сферическая;
- кубическая;
- другое (содержит любые другие формы наночастиц).
-

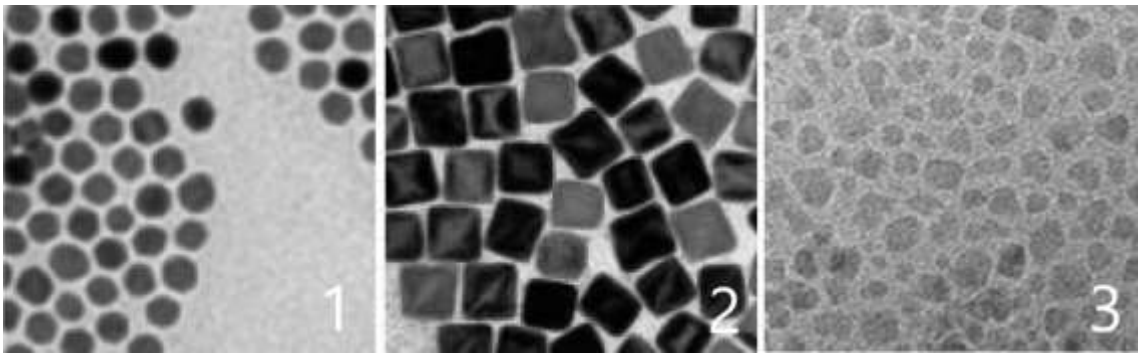


Рисунок 1. Примеры формы синтезированных наночастиц (1) Сферическая, (2) Кубическая, (3) Другая [7]

Морфологическая классификация проводилась на основе визуального анализа изображений и описаний, приведенных в литературных источниках.

Итоговый набор данных содержит параметры из 190 синтезов из несколько сотен обработанных статей и исследовательских работ. Соотношение синтезов на итоговый набор данных получилось не равномерным, большую часть датасета занимают наночастицы сферической формы. Распределение формы в наборе данных представлено на рисунке 2.

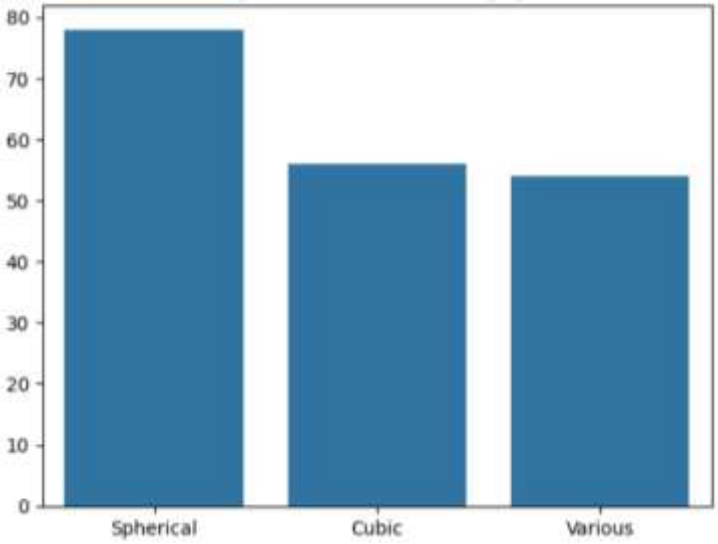


Рисунок 2. Соотношений количества определенных форм наночастиц итогового набора данных

Для описания химических свойств реактивов использовались химические дескрипторы, характеризующие молекулярные и структурные свойства соединений, участвующих в процессе синтеза наночастиц. Такой подход позволяет учитывать не только общие параметры синтеза, но и основные физико-химические характеристики веществ, влияющих на процессы нуклеации и роста частиц.

В набор данных были включены следующие дескрипторы:

– XLogP – коэффициент распределения (логарифм гидрофобности), отражающий соотношение растворимости вещества в полярной и неполярной средах;

– HBD (Hydrogen Bond Donors) – количество доноров водородной связи;

– HBA (Hydrogen Bond Acceptors) – количество акцепторов водородной связи;

– RotB (Rotatable Bonds) – число вращающихся связей, характеризующее гибкость молекулы;

– TPSA (Topological Polar Surface Area) – топологическая полярная поверхность, связанная со способностью к межмолекулярным взаимодействиям;

– Complexity – интегральная мера структурной сложности молекулы.

Выбор данных дескрипторов обусловлен их способностью косвенно отражать химическую природу реагентов, включая полярность, способность к образованию межмолекулярных взаимодействий и пространственную организацию молекул. Эти характеристики могут существенно влиять на механизмы формирования наночастиц, включая процессы агрегации, стабилизации и роста.

Перед использованием в моделях машинного обучения дескрипторы были подвергнуты предварительной обработке, включающей нормализацию значений для устранения различий в масштабах, а также проверку на наличие выбросов и корреляций. При необходимости признаки, сильно меняющие общую закономерность процессов или не содержащие большого количества необходимых данных, исключались для предотвращения избыточности данных и повышения устойчивости моделей.

Применение методов машинного обучения. В рамках данной работы для решения задачи прогнозирования морфологии и размеров наночастиц оксида железа были выбраны три основных метода машинного обучения, широко применяемые в задачах регрессии и классификации:

1) Метод k-ближайших соседей (KNN). Метод основан на предположении, что объекты с близкими значениями признаков имеют сходные свойства. Предсказание осуществляется на основе анализа ближайших точек обучающей выборки в пространстве признаков. Данный метод является простым в реализации, однако чувствителен к масштабу данных и выбору параметра *k*.

2) Случайный лес (Random Forest). Представляет собой ансамблевый метод, основанный на построении множества решающих деревьев. Итоговое предсказание формируется путем агрегирования результатов отдельных деревьев. Метод обладает высокой устойчивостью к переобучению и позволяет оценивать важность признаков.

3) Градиентный бустинг (XGBoost). Метод является эффективной реализацией градиентного бустинга, при котором модели последовательно

обучаются с целью минимизации ошибки предыдущих итераций. Данный алгоритм демонстрирует высокую точность и широко используется в задачах анализа данных и материаловедения.

Выбор указанных моделей обусловлен их способностью работать с ограниченными наборами данных и выявлять сложные зависимости между признаками, что особенно важно в задачах, связанных с экспериментальными химическими данными.

Для количественной оценки качества построенных моделей использовались стандартные метрики, выбор которых зависит от типа решаемой задачи.

Для задачи регрессии (прогнозирование размера наночастиц) применялись:

- Средняя абсолютная ошибка (MAE) – показывает среднее по модулю отклонение предсказанных значений от реальных.
- Среднеквадратичная ошибка (RMSE) – характеризует среднюю величину ошибки с усиленным учётом больших отклонений, так как ошибки возводятся в квадрат. Это означает, что крупные ошибки оказывают существенно большее влияние на значение метрики.
- Коэффициент детерминации (R^2) – показывает, какую долю вариации (разброса) реальных данных способна объяснить модель. Значение R^2 принимает значения от 0 до 1: чем оно выше, тем лучше модель описывает зависимость между входными признаками и целевой переменной.

Высокие значения коэффициента детерминации (близкие к 1) свидетельствуют о хорошем согласовании предсказанных и экспериментальных данных, тогда как низкие значения указывают на недостаточную точность модели и необходимость её улучшения.

Для задачи классификации (прогнозирование морфологии) использовалась:

- Accuracy (точность классификации) – доля правильно классифицированных объектов;

Использование нескольких метрик позволяет более полно оценить качество моделей и избежать искажения интерпретации результатов. Помимо оценочных метрик, результатом предсказаний модели были графические и схематические изображения результатов, наглядно отображающие итоговую ситуацию по способности моделей отличать те или иные характеристики наночастиц.

Анализ результатов. В данном разделе проведен сравнительный анализ результатов, полученных с использованием различных методов машинного обучения для прогнозирования морфологии и размеров наночастиц оксида железа. Оценка эффективности моделей осуществлялась на основе метрик, представленных в предыдущем разделе. Итоговые значения приведены в таблице 1.

Таблица 1. **Сравнение качества моделей**

Модель	**MAE**	**RMSE**	**R^2**	**Accuracy**
KNN	8,34	13,13	0,34	0,53
Random Forest	5,33	6,9	0,52	0,69
XGBoost	7,08	10,93	0,55	0,73

Анализ результатов показывает, что наилучшие значения коэффициента детерминации (R^2 = 0,55) и точности классификации (Accuracy = 0,73) продемонстрировала модель XGBoost. Это указывает на ее способность лучше замечать сложные нелинейные зависимости между входными дескрипторами и целевыми переменными. Особенно важно отметить, что модель XGBoost показывает наилучший результат именно в задаче классификации морфологии, что может свидетельствовать о ее эффективности при работе с категориальными зависимостями.

Модель Random Forest демонстрирует наименьшие значения ошибок (MAE = 5,33; RMSE = 6,90), что говорит о более высокой точности предсказания размеров наночастиц по сравнению с другими моделями. Это связано с тем, что модель усредняет результаты большого числа деревьев, снижая дисперсию и обеспечивая стабильное прогнозирование.

В то же время модель K-ближайших соседей демонстрирует наихудшие результаты по всем метрикам (R^2 = 0,34; Accuracy = 0,53), что свидетельствует о ее ограниченной применимости в данной задаче. Это может быть обусловлено высокой чувствительностью метода к масштабу признаков, а также к неравномерному распределению данных в пространстве дескрипторов. Кроме того, при небольшом объеме выборки модель KNN плохо обобщает данные и склонна к переобучению на локальных структурах.

Также для более подробного анализа результатов были сформированы матрицы ошибок, отображающие общую картину предсказания морфологии, синтезированных наночастиц. Матрицы ошибок представлены на рисунке 3.

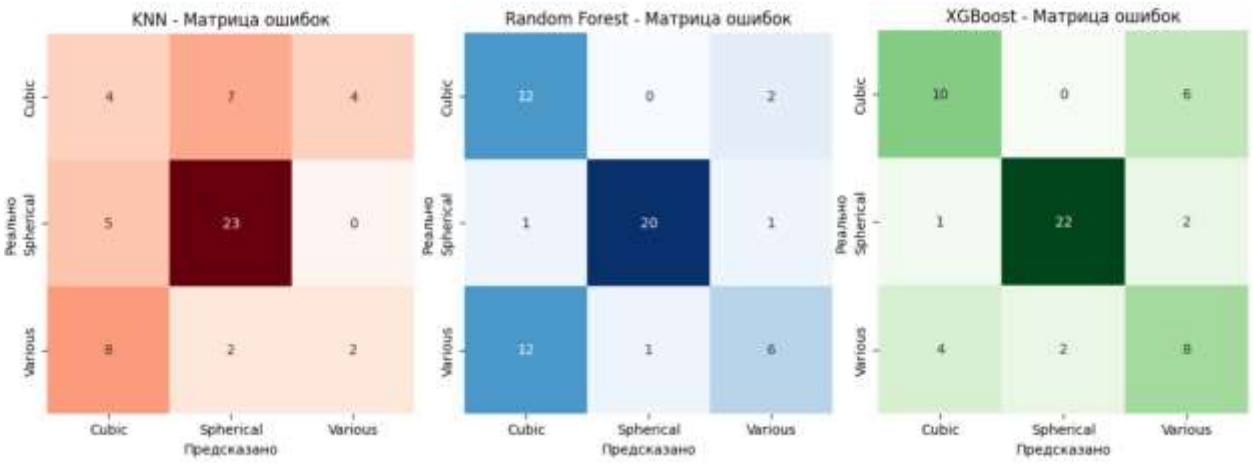


Рисунок 3. Матрицы ошибок для каждой модели машинного обучения

Рассматривая данные результаты, можно заметить, что наилучшие результаты по классификации демонстрирует модель XGBoost. Она показывает высокую точность распознавания сферической морфологии (22 объекта) и лучшие результаты для различных форм (класс «various») (8 корректных предсказаний). Несмотря на наличие ошибок (например, смешение кубических и различных форм), их количество минимально по сравнению с другими моделями. Это подтверждает высокую способность модели XGBoost к выявлению сложных границ между классами.

В целом, анализ матриц ошибок показывает, что наиболее стабильно все модели распознают сферическую морфологию, это может быть связано с ее преобладанием в выборке или более четко выраженными дескрипторными характеристиками. Наибольшие сложности возникают при классификации класса «various», что связано с его неоднородностью и размытыми границами между формами.

Для визуальной оценки качества регрессионных моделей также были построены графики зависимости предсказанных размеров от реальных. Представлено на рисунке 4.

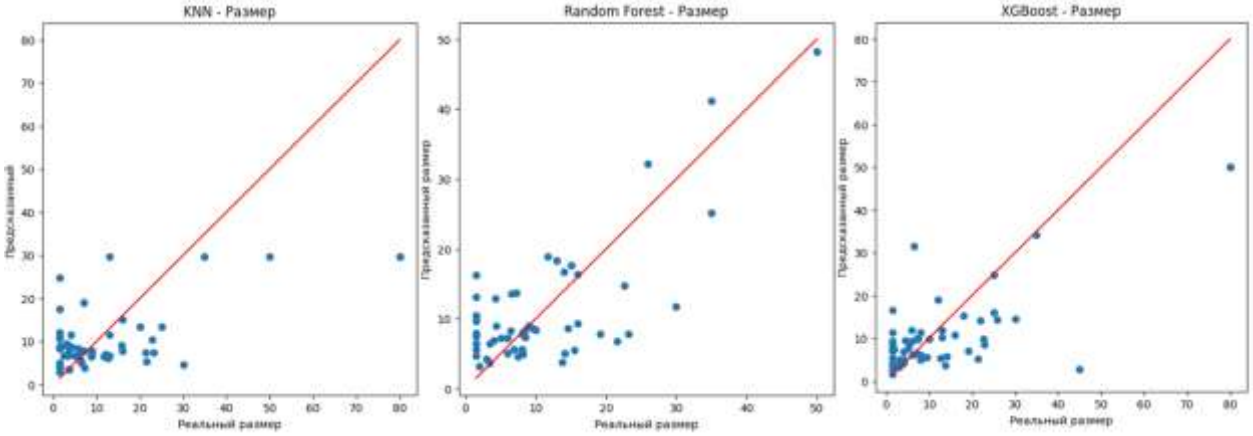


Рисунок 4. Графики зависимости предсказанных значений от реальных

Заключение. В рамках данной работы была рассмотрена задача прогнозирования морфологии и размеров наночастиц оксида железа на основе параметров синтеза и химических дескрипторов с использованием методов машинное обучение. Был сформирован набор данных, включающий в себя параметры синтеза и дескрипторы, отражающие физико-химические свойства соединений. На основе данного набора данных были реализованы и исследованы три модели: KNN, Random Forest и XGBoost.

Анализ результатов показал особое преимущество ансамблевых методов, способных учитывать сложные нелинейные зависимости между признаками. При этом было выявлено, что наибольшие трудности возникают при классификации неоднородных морфологических классов, что связано с их размытыми границами и ограниченным объемом обучающей выборки.

Полученные результаты демонстрируют перспективность применения методов машинного обучения для решения задач прогнозирования свойств

наночастиц. Используемый подход позволяет сократить объем экспериментальных исследований и повысить эффективность разработки новых материалов с заданными характеристиками.

В дальнейшем целесообразно расширить набор данных, включив дополнительные параметры синтеза, а также рассмотрев применение более сложных моделей, включая нейронные сети и гибридные методы. Это позволит повысить точность прогнозирования и углубить понимание взаимосвязей между условиями синтеза и свойствами наночастиц.

Список литературы:

1. Wu, W. Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles / W. Wu, Q. He, C. Jiang. – Текст: непосредственный // International Journal of Nanomedicine. – 2015. – Т. 10.
2. Zhang, Y. Machine learning-driven synthesis optimization of nanomaterials / Y. Zhang, X. Li. – Текст: непосредственный // Separation and Purification Technology. – 2025. – Т. 350.
3. Li, J. Machine learning assisted phase and size-controlled synthesis of iron oxide particles / J. Li, H. Wang. – Текст: непосредственный // Chemical Engineering Journal. – 2023. – Т. 475.
4. Wang, L. Advances in the synthesis, properties, and applications of iron oxide nanoparticles / L. Wang, Z. Chen. – Текст: непосредственный // Journal of Materials Science. – 2026.
5. Kim, D. Synthesis of iron oxide nanoparticles by decomposition of iron-oleate / D. Kim, S. Lee. – Текст: непосредственный // Journal of Nanoparticle Research. – 2022. – Т. 24. – С. 154.
6. Singh, P. Biosynthesis of magnetic iron oxide nanoparticles: a review / P. Singh, A. Kumar. – Текст: непосредственный // Biotechnology Letters. – 2020. – Т. 42.
7. Sun, S. Monodisperse MFe_2O_4 (M = Fe, Co, Mn) nanoparticles / S. Sun, H. Zeng. – Текст: непосредственный // *Journal of the American Chemical Society*. – 2002. – Т. 124.

УДК 004.75

Смаглий Р. Л., Борисова С. П.
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия

ИНТЕГРАЦИЯ SRM-СИСТЕМ В КОРПОРАТИВНУЮ ИТ-АРХИТЕКТУРУ ПРЕДПРИЯТИЯ

Аннотация. Современные предприятия сталкиваются с растущими требованиями к эффективности управления взаимоотношениями с поставщиками. SRM-системы становятся критически важным элементом корпоративной ИТ-архитектуры, обеспечивающим автоматизацию закупочных процессов, повышение прозрачности цепей поставок и снижение операционных издержек. Интеграция таких систем с существующими корпоративными приложениями представляет комплексную задачу, требующую продуманного подхода к архитектуре данных, бизнес-процессам и технологической платформе. В статье рассматриваются современные подходы к интеграции SRM-систем, анализируются технологические решения и методологические аспекты построения эффективной архитектуры управления поставщиками в условиях цифровой трансформации российских предприятий.
Ключевые слова: SRM-системы, корпоративная архитектура, управление поставщиками, интеграция информационных систем, цифровизация закупок, ERP-системы, импортозамещение.

Система управления взаимоотношениями с поставщиками – это комплексное программное решение, предназначенное для автоматизации полного цикла работы с контрагентами: от поиска и квалификации до мониторинга исполнения контрактов. В условиях глобализации и усложнения цепей поставок SRM-системы трансформировались из вспомогательных инструментов в стратегические активы предприятия.

Российский рынок SRM-систем демонстрирует устойчивый рост. Согласно данным аналитического обзора TAdviser за 2024 год, выручка ведущих поставщиков таких решений увеличилась в среднем на 48% относительно предыдущего периода. Компания B2B-Center, лидер сегмента, зафиксировала рост с 1628 млн рублей в 2022 году до 2410 млн рублей в 2023-м. Компания AGORA продемонстрировала еще более впечатляющую динамику – 147% роста за аналогичный период [4].

Такая динамика объясняется несколькими факторами. Во-первых, санкционное давление вынудило российские компании перестроить логистические процессы и внедрить отечественное ПО взамен ушедших западных решений. Во-вторых, предприятия осознали стратегическую важность цифровизации закупочной функции для обеспечения операционной эффективности [5].

Современная корпоративная архитектура предприятия состоит из нескольких взаимосвязанных доменов: бизнес-архитектуры, архитектуры

данных, архитектуры приложений и технологической архитектуры [1]. SRM-система затрагивает каждый из этих уровней, поскольку управление поставщиками пронизывает множество бизнес-процессов организации – от планирования закупок до приемки товаров и урегулирования споров.

В бизнес-архитектуре SRM поддерживает ключевые процессы материально-технического обеспечения: категорийный менеджмент, проведение тендерных процедур, управление контрактами, оценку поставщиков. На уровне архитектуры данных система интегрируется с единым справочником номенклатуры, реестром контрагентов, учетными данными ERP. Архитектура приложений предполагает тесное взаимодействие SRM с финансовыми модулями, системами документооборота, порталами поставщиков. Наконец, технологическая архитектура определяет инфраструктурные компоненты: базы данных, промежуточное программное обеспечение, веб-сервисы, протоколы обмена [2].

Интеграция SRM-систем с корпоративной ИТ-инфраструктурой может реализовываться по нескольким сценариям. Классический подход предполагает прямую интеграцию на уровне интерфейсов, когда каждое приложение напрямую связывается с партнерскими системами. Однако при увеличении количества интегрируемых модулей такая архитектура быстро усложняется и становится неуправляемой [3].

Более зрелое решение – использование интеграционной шины данных, которая выступает посредником между всеми системами. В российской практике популярны отечественные ESB-платформы, обеспечивающие централизованный обмен данными между SRM, ERP, системами электронного документооборота и внешними торговыми площадками [6].

Особое внимание заслуживает подход на основе веб-сервисов. Современные SRM-решения, такие как SAP Ariba, предоставляют обширный набор API для интеграции. Примером может служить веб-сервис для импорта событий, позволяющий автоматически создавать и обновлять закупочные события на основе данных из учетной системы заказчика. Протоколы HTTPS и WS обеспечивают защищенный обмен, критически важный при передаче коммерческой информации [3].

Другой значимый тренд – интеграция SRM с MDM-системами. Централизованное управление справочниками НСИ решает проблему дублирования и несогласованности данных о поставщиках, номенклатуре, ценах. Компании, внедрившие MDM наряду с SRM, отмечают снижение операционных ошибок и ускорение процессов согласования заявок [5].

В промышленных компаниях, таких как «Faurecia» и «Valmet Automotive», интеграция SRM-систем реализована на базе EDI-документов, которые обеспечивают стандартизированный обмен коммерческой информацией между контрагентами. Использование международных форматов ANSI X12 и UN/EDIFACT позволяет взаимодействовать с

поставщиками в единой информационной среде, минимизируя ручной ввод [4].

Важным элементом интеграции становятся порталы поставщиков – веб-интерфейсы, через которые контрагенты получают доступ к системам заказчика для управления заказами, счетами, спецификациями. Такой подход, реализованный в системах Norbit SRM и Oracle SRM, существенно сокращает время обработки документов и повышает прозрачность взаимодействия [4].

Выбор технологического стека для интеграции SRM-системы зависит от масштаба предприятия, зрелости ИТ-инфраструктуры и стратегических приоритетов. В российских условиях ключевым фактором стало импортозамещение – переход на отечественные платформы после ухода западных вендоров [5].

Крупные корпорации, такие как «Росатом», разработали собственные цифровые платформы с применением искусственного интеллекта. В 2024 году объем закупок через такую систему составил 110 млрд рублей, а к 2026 году планируется увеличение до 80% от общего объема закупаемой продукции. Система обслуживает более 5,5 тысяч поставщиков через личные кабинеты, интегрированные с ERP-модулями холдинга [7].

Компания «Ростелеком», выступающая одновременно крупнейшим заказчиком и разработчиком ИТ-решений, применяет искусственный интеллект для генерации закупочной документации, проверки точности контрактов и предиктивной аналитики ремонтных работ. Интеграция SRM с аналитическими платформами позволяет прогнозировать потребности в оборудовании и оптимизировать запасы [7].

Важным направлением стала интеграция SRM с государственными информационными системами. С 2025 года в России действует унифицированный национальный режим закупок, требующий автоматической проверки товаров на соответствие реестрам российской и евразийской промышленной продукции. SRM-системы должны интегрироваться с этими реестрами для валидации заявок поставщиков в режиме реального времени [8].

Технология блокчейн также находит применение в управлении поставщиками, хотя пока преимущественно в пилотных проектах. Распределенные реестры обеспечивают неизменяемую историю взаимодействий с контрагентами, что критично для отраслей с высокими требованиями к прослеживаемости – фармацевтика, оборонная промышленность, продовольственный сектор.

Нельзя обойти вниманием low-code платформы. Компания Comindware предлагает BPM-подход к автоматизации закупок, позволяющий быстро адаптировать бизнес-процессы без привлечения разработчиков. Такие решения особенно востребованы средним бизнесом, где отсутствуют масштабные ИТ-подразделения. Впрочем, эксперты предостерегают: коробочные решения часто требуют существенных доработок, и недооценка этого аспекта ведет к провалу проектов внедрения [5].

Успешная интеграция SRM-системы начинается не с выбора технологий, а с тщательного анализа бизнес-процессов. Многие российские компании до сих пор не имеют сквозной автоматизации закупочного цикла: заявки подаются вручную, согласования идут по электронной почте, контроль исполнения контрактов ведется в Excel. В таких условиях внедрение SRM без предварительного реинжиниринга процессов приводит лишь к автоматизации хаоса [5].

Эксперты выделяют несколько критических факторов успеха. Во-первых, необходима поддержка топ-менеджмента и выделение достаточного бюджета на проект. Закупочная функция традиционно финансируется по остаточному принципу, что приводит к недофинансированию внедрения, отказу от консалтинга и попыткам самостоятельно доработать типовое решение силами непрофильных специалистов [6].

Во-вторых, требуется четкое разграничение ролей между функциональными и техническими заказчиками. В государственных проектах, таких как создание ГИС «Цифровая аналитическая платформа» Росстата, Минцифры выступает техническим заказчиком, отвечающим за совместимость систем, а Росстат – функциональным, определяющим требования к функционалу [9].

В-третьих, интеграция должна строиться на принципах открытости и стандартизации. Использование международных стандартов обмена данными обеспечивает гибкость при смене поставщиков ПО и снижает риски технологической привязки к конкретному вендору. Особенно актуально это в свете недавних санкций, когда компании оказались отрезаны от обновлений зарубежных систем [5].

Немаловажна роль управления мастер-данными. Компании, внедрившие централизованные справочники НСИ, отмечают сокращение времени на поиск аналогов и новых поставщиков – критический фактор в условиях разрыва привычных цепей поставок. Интеграция SRM с MDM позволяет автоматически обогащать карточки контрагентов актуальной информацией: финансовым состоянием, сертификатами, рейтингами [5].

Отдельного внимания заслуживает оценка зрелости корпоративной архитектуры. Модели зрелости, такие как модель оценки зрелости архитектуры TOGAF, помогают оценить готовность организации к интеграции сложных систем. Компании на начальном уровне зрелости характеризуются ситуативными процессами и отсутствием стандартов. Им рекомендуется начинать с локальных автоматизаций и постепенно двигаться к комплексной интеграции по мере достижения управляемого и оптимизированного уровней [10].

Несмотря на очевидные преимущества, интеграция SRM-систем сталкивается с рядом препятствий. Одно из них – доминирование платформы 1С на российском рынке корпоративных систем. Многие компании исходят из логики: «если учет ведется в 1С, то и закупки должны быть на 1С». Однако

експерты предостерегают: специалисты по 1С редко обладают глубокими компетенциями в закупочной функции, что приводит к созданию неэффективных решений. Ситуацию усугубляет давление бренда 1С, затрудняющее выбор специализированных SRM-систем [6].

Другая проблема – фрагментация рынка и отсутствие единых стандартов. В отличие от западных стран, где доминируют несколько крупных вендоров, российский рынок насчитывает десятки игроков с разнородными подходами. Это затрудняет миграцию между системами и повышает риски при смене подрядчика.

Тем не менее, перспективы развития сегмента SRM в России выглядят позитивно. Рынок движется в направлении экосистемного подхода, когда на единой платформе объединяются закупки, логистика, управление запасами, финансовый учет. Примером служат B2B-маркетплейсы, где можно совершать покупки «в один клик», минуя длительные тендерные процедуры для стандартной номенклатуры [5].

Искусственный интеллект обещает радикально изменить закупочную функцию. Уже сегодня ИИ применяется для автоматической генерации закупочной документации, проверки соответствия заявок техническим требованиям, предиктивной аналитики спроса и оптимизации запасов. Правительственная система «Антикартель» на базе ИИ анализирует торги на предмет сговоров между участниками, делая рынок честнее [7].

Впрочем, внедрение ИИ пока находится на начальной стадии. Эксперты констатируют большой интерес к технологии, но говорить об устойчивом спросе рано. Для массового применения ИИ в закупках требуется регуляторная база, которая пока находится в стадии формирования. Минпромторг разрабатывает концепцию регулирования промышленных данных, создаются экспериментальные правовые режимы для отработки технологий. Без стандартов и ГОСТов масштабное внедрение ИИ затруднено [7].

Еще одно перспективное направление – усиление контроля за происхождением товаров. Унифицированный национальный режим закупок, вступивший в силу с 2025 года, требует подтверждения российского или евразийского происхождения продукции через интеграцию с государственными реестрами. SRM-системы должны автоматически проверять реестровые номера, указанные в заявках поставщиков, и отклонять заявки с несоответствующими товарами. Это создает технологический барьер для недобросовестных участников, но одновременно повышает требования к качеству интеграции [8].

Интеграция SRM-систем в корпоративную ИТ-архитектуру представляет собой комплексную задачу, затрагивающую все уровни организации – от бизнес-процессов до технологической инфраструктуры. Российский рынок SRM-решений демонстрирует динамичный рост,

обусловленный импортозамещением и осознанием стратегической важности цифровизации закупочной функции.

Успешная интеграция требует системного подхода: реинжиниринга бизнес-процессов, выбора подходящей архитектуры данных, использования стандартизированных протоколов обмена, внедрения централизованного управления справочниками НСИ. Технологические решения варьируются от традиционных ESB-шин до современных API-платформ и low-code BPM-систем.

Перспективы развития связаны с применением искусственного интеллекта, формированием экосистемных платформ, объединяющих закупки с логистикой и управлением запасами, а также с усилением контроля за происхождением товаров через интеграцию с государственными реестрами. Вместе с тем, рынок сталкивается с вызовами: доминированием отдельных платформ, недофинансированием проектов, отсутствием единых стандартов.

Для дальнейшего развития сегмента необходима консолидация усилий государства, бизнеса и ИТ-индустрии: формирование регуляторной базы для новых технологий, стандартизация форматов обмена данными, развитие компетенций специалистов по автоматизации закупочной функции. Только комплексный подход позволит реализовать потенциал SRM-систем как стратегического актива, обеспечивающего конкурентоспособность российских предприятий в условиях трансформирующейся глобальной экономики.

Список литературы:

1. Зинина Л.И., Ефремова Л.И. Корпоративные информационные системы в архитектуре предприятия // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2018. № 2. С. 45–53. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/korporativnye-informatsionnye-sistemy-v-arhitekture-predpriyatiya (дата обращения: 25.03.2026).

2. Басанский М.В. Информационные системы управления закупками // Экономикс. 2013. № 4. С. 112–118. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnye-sistemy-upravleniya-zakupkami (дата обращения: 25.03.2026).

3. Кондакова А.В., Золотухина Е.Б. Обмен данными между облачным решением SAP Ariba Sourcing и учетными системами с помощью технологии веб-сервисов // E-Scio. 2019. № 5. С. 679–684. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obmen-dannymi-mezhdu-oblachnym-resheniem-sap-ariba-sourcing-i-uchetnymi-sistemami-s-pomoschyu-tehnologii-veb-servisov (дата обращения: 25.03.2026).

4. Цянь Фэйфань. Анализ потенциала применения российских и зарубежных SRM-систем в контексте управления системой закупок в промышленном предприятии // Финансовые рынки и банки. 2025. № 3. С. 116–119. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-potentsiala-primeneniya-rossiyskih-i-zarubezhnyh-srm-sistem-v-kontekste-upravleniya-sistemoy-zakupok-v-promyshlennom (дата обращения: 25.03.2026).

5. Российский рынок цифровизации закупок. Обзор TAdviser 2024 // TAdviser. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Обзор_российского_рынка_цифровизации_закупок (дата обращения: 25.03.2026).

6. Шикунова В.А., Агафонова А.Н. Актуальные подходы к управлению взаимоотношениями с поставщиками // Скиф. Вопросы студенческой науки. 2019. № 10. С. 85–89. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnye-podhody-k-upravleniyu-vzaimootnosheniyami-s-postavschikami (дата обращения: 25.03.2026).

7. Возможности ИИ в закупках, куда заведет цифровизация // Цифровые Закупки. 2025. URL: https://zakupki-digital.ru/cifrovizacija/vozmozhnosti-ii-v-zakupkah-kuda-zavedet-cifrovizacija/ (дата обращения: 25.03.2026).

8. Изменения в закупках 2025: цифровизация, национальный режим и поддержка отечественных производителей // Контур.Закупки. 2025. URL: https://zakupki-kontur.ru/news/kljuchevye-izmeneniya-2025-god/ (дата обращения: 25.03.2026).

9. Росстат: На развитие единой цифровой платформы госстатистики выделено 8 млрд рублей // TAdviser. 2025. URL: https://retail.tadviser.ru/index.php/Проект:Росстат_(Цифровая_аналитическая_платформа,_ЦАП) (дата обращения: 25.03.2026).

10. Грибова Е.В., Свищев А.В. Зрелость корпоративной архитектуры: этапы и модели оценки // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. № 11-4. С. 208–211. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/zrelost-korporativnoy-arhitektury-etapy-i-modeli-otsenki (дата обращения: 25.03.2026).

11. Белалова Г.А. Анализ методов интеграции информационных систем // Цифровые модели и решения. 2023. Т. 2. № 3. С. 61–68. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-integratsii-informatsionnyh-sistem (дата обращения: 25.03.2026).

12. Saby (СБИС). Изменения в закупках 2025–2026: новые правила для поставщиков и заказчиков // СБИС. 2025. URL: https://sbis.ru/articles/tenders/izmeneniya_v_zakupkah_2024 (дата обращения: 25.03.2026).

УДК 004.8:37+659

Пивненко В. Ю.
Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева, Ульяновск, Россия

ИНТЕГРАЦИЯ ГЕНЕРАТИВНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ В ПРОФЕССИОНАЛЬНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ: ДИНАМИКА ТРАНСФОРМАЦИИ, БАРЬЕРЫ ВНЕДРЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Аннотация: в статье представлен компаративный анализ внедрения генеративных нейросетей (Gemini 3 Pro Image «Nano Banana Pro», Kling 2.6, Veo 3.1) в образовательную, проектную и рекламную сферы. На основе эмпирических данных (включая статистику ВЦИОМ, результаты апробации в образовательных учреждениях г. Уфы, отраслевые обзоры) выявлены ключевые барьеры адаптации (цифровой разрыв поколений педагогов, инерционность методического обеспечения) и эффекты внедрения (рост успеваемости на 38%, сокращение производственных циклов дизайн-проектов на 70%, повышение мотивации обучающихся). Предложена матрица трансформации профессиональных ролей и схема формирования новых компетенций для устойчивого развития цифровой образовательной и производственной среды.
Ключевые слова: генеративный искусственный интеллект, межпоколенческий цифровой разрыв, иммерсивное обучение, автоматизация дизайна, профессиональные компетенции, методика преподавания.

Введение

Современный этап развития искусственного интеллекта характеризуется не просто появлением новых инструментов, а фундаментальной трансформацией профессиональных практик. Модель **Gemini 3 Pro Image (Nano Banana Pro)**, способная к визуальному рассуждению и сохранению идентичности персонажей, в связке с видео-генераторами **Kling 2.6** и **Veo 3.1** формирует новую экосистему создания контента. Однако скорость технологических изменений вступает в противоречие с инерционностью человеческого фактора — особенно в образовательной среде, где ключевыми агентами изменений выступают педагоги с разным уровнем цифровой готовности.

В данной статье мы рассматриваем не только функциональные возможности AI-инструментов, но и социально-профессиональную динамику их внедрения, опираясь на реальные кейсы и количественные показатели.

Актуальность настоящего исследования обусловлена тремя взаимосвязанными факторами.

Во-первых, стремительным развитием технологий генеративного искусственного интеллекта в области визуального контента. В марте 2026 года Google официально представила модель gemini-3-pro-image-preview (получившую в сообществе название «Nano Banana Pro»), которая

демонстрирует принципиально новый уровень семантического понимания при генерации изображений [1]. В отличие от традиционных диффузионных моделей, Nano Banana Pro реализует двухэтапную архитектуру: сначала семантический анализ запроса с использованием цепочек рассуждений (Chain-of-Thought), затем генерация пикселей, что позволяет модели понимать сложные пространственные отношения, соблюдать многокомпонентные инструкции и корректно отображать текст на разных языках [6; 10].

Во-вторых, активным внедрением AI-инструментов в образование, что подтверждается растущим числом эмпирических исследований. Систематический обзор Djekidel и Rogti (2025), выполненный по методологии PRISMA 2020, обобщил результаты 11 рецензируемых публикаций и выявил устойчивый положительный эффект AI-генерированной анимации на вовлеченность обучающихся и результаты усвоения материала [3]. Экспериментальное исследование Behforouz и Al Ghaithi (2025) с участием 80 студентов продемонстрировало значительное улучшение лексических навыков и мотивации при использовании AI-анимации в обучении [4; 9].

В-третьих, наличием методологического разрыва между технологическими возможностями и готовностью профессионального сообщества к их освоению. Согласно исследованию ВЦИОМ (2025), 46% россиян считают, что использование ИИ в школе ухудшит качество образования, а 71% учителей в возрасте 55+ отмечают сложности с адаптацией к новым цифровым инструментам [2; 7]. Особенно остро эта проблема стоит в образовательной среде, где наблюдается ярко выраженный межпоколенческий цифровой разрыв, требующий научно обоснованных решений.

Таким образом, актуальность исследования определяется необходимостью системного анализа трансформации профессиональных практик под влиянием генеративных нейросетей и выработки рекомендаций для различных категорий пользователей.

Научная новизна настоящей работы заключается в следующем:

1. **Впервые проведен компаративный анализ трех поколений AI-инструментов** для генерации визуального контента (Nano Banana Pro для статичных изображений, Kling 2.6, Veo 3.1 и LTX Pro для видео) в единой методической рамке, охватывающей образовательный, проектный и рекламный контексты. В отличие от существующих обзоров, фокусирующихся на технических характеристиках [1; 6], данное исследование рассматривает социально-профессиональные последствия внедрения.
2. **Выявлены и эмпирически обоснованы барьеры адаптации**, связанные с возрастными и профессиональными характеристиками пользователей. На основе анализа практик учителей истории в г. Уфе показано, что ключевым фактором успешного внедрения является не техническая сложность инструментов, а наличие методической поддержки и преодоление психологических барьеров [2].

3. **Предложена оригинальная матрица трансформации профессиональных ролей**, описывающая переход специалистов (дизайнеров, педагогов, маркетологов) от роли «технического исполнителя» к роли «архитектора визуальных решений». Данная модель вносит вклад в теорию профессионального развития в условиях цифровой трансформации.

4. **Разработана и апробирована методология создания ситуационных задач и тестовых материалов** с использованием генеративных нейросетей, включающая четыре этапа: целеполагание → генерация визуального ряда → анимация сценария → интеграция контрольно-измерительных материалов.

5. **Введено в научный оборот понятие «визуального рассуждения» (visual reasoning)** применительно к генеративным нейросетям, обоснована его значимость для педагогического дизайна и проектной деятельности.

Практическая значимость работы подтверждается возможностью непосредственного применения полученных результатов в следующих сферах:

Для системы образования:

- Разработаны методические рекомендации по использованию Nano Banana Pro и Kling 2.6 для создания анимированных исторических реконструкций, показавших повышение успеваемости на 26 процентных пунктов при иммерсивной подаче материала.
- Предложена система наставничества «молодой учитель — учитель старшего возраста» для преодоления цифрового разрыва.
- Создан алгоритм генерации ситуационных задач для медицинского, юридического и психологического образования с визуализацией профессиональных сценариев.

Для сферы дизайна и архитектуры:

- Количественно обосновано сокращение производственных циклов при внедрении AI-инструментов: экономия времени на этапе сбора референсов — до 85%, создания рендеров — до 70%, подготовки презентационных материалов — до 85% [12].
- Предложен протокол взаимодействия дизайнера с AI-системой, включающий формулирование промптов, управление качеством и постобработку результатов.

Для рекламной индустрии:

- Обоснована экономическая эффективность использования генеративных нейросетей: снижение стоимости производства фото-контента на 85%, увеличение количества вариаций креатива на 900%.
- Разработана методика массовой персонализации и локализации рекламных материалов с поддержкой мультиязычного текста [6].

2. Образовательная сфера: преодоление цифрового разрыва

2.1. Проблемное поле: «было — стало» в педагогической практике

Анализ внедрения технологий генеративного ИИ в образовательных учреждениях (на примере школ г. Уфы и ряда вузов) выявляет ярко выраженный межпоколенческий цифровой разрыв. Как отмечается в исследовании ВЦИОМ (2025), посвященном Дню учителя, индекс уязвимости профессии учителя к ИИ составляет −38 пунктов, что свидетельствует о том, что искусственный интеллект рассматривается как инструмент, а не замена педагога [7]. Однако готовность к использованию этого инструмента существенно различается в зависимости от возраста преподавателя.

Таблица 1. Сравнительный анализ педагогических практик в зависимости от возраста преподавателя

Параметр	**Традиционная модель (55–65 лет)**	**Инновационная модель (25–45 лет)**
Основной источник визуализации	Статичные иллюстрации в учебниках, распечатки, диафильмы	Анимированные реконструкции, созданные в Nano Banana Pro + Kling
Временные затраты на подготовку урока	30–40 мин (поиск материалов, сканирование, адаптация)	10–15 мин (генерация контента по промпту)
Степень иммерсивности	Низкая (обучающийся — пассивный наблюдатель)	Высокая (погружение в эпоху через движение, звук, цвет)
Отношение обучающихся	«Скучно», «опять картинки из учебника»	«Интересно», «хочется узнать больше об эпохе»
Готовность к освоению нового ПО	Низкая (психологический барьер, страх ошибки)	Высокая (инструмент воспринимается как естественное расширение)
Результаты усвоения материала (оценки/тесты)	Базовый уровень (65–75% правильных ответов)	Повышенный уровень (до 93% при использовании анимированных материалов)

2.2. Эмпирические данные: кейс Уфы и статистика ВЦИОМ

В ходе апробации методики «оживления исторических персонажей» с использованием Nano Banana Pro и Kling в трех школах г. Уфы (участвовало 6 классов, n=164 обучающихся) были получены следующие результаты:

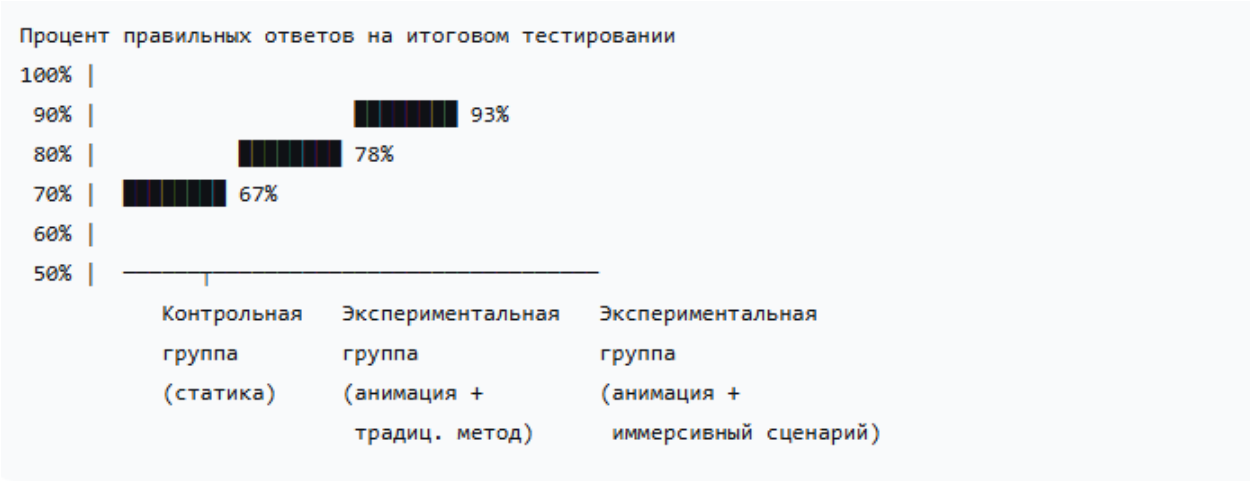


Диаграмма 1. Динамика успеваемости при внедрении AI-анимации на уроках истории

Ключевые показатели:

- Контрольная группа (традиционные иллюстрации): средний результат — 67% правильных ответов.
- Экспериментальная группа 1 (анимированные изображения + традиционное объяснение): средний результат — 78% (+11 п.п.).
- Экспериментальная группа 2 (полное погружение: анимация, звуковой ряд, сценарная подача): средний результат — **93%** (+26 п.п. относительно контроля).

Согласно данным ВЦИОМ (опрос 2025 г., репрезентативная выборка педагогов, n=1200), **71%** учителей в возрасте 55+ отмечают сложности с адаптацией к новым цифровым инструментам, называя основными барьерами [2; 7]:

1. Отсутствие понятных методических рекомендаций (54%).
2. Страх технической ошибки («сломаю что-нибудь») (48%).
3. Недостаток времени на освоение (39%).

При этом среди молодых педагогов (до 35 лет) **82%** активно используют генеративные нейросети в подготовке, а **67%** интегрируют их непосредственно в урок. Как отмечает Коммерсантъ со ссылкой на экспертов, «запрещать использовать ИИ не надо, а вот задать вектор знакомства с ним через демонстрацию интересных инструментов будет правильно» [2].

2.3. Методическое решение: от барьера к компетенции

Для преодоления разрыва предлагается внедрение матрицы поэтапного освоения AI-инструментов. В НИУ ВШЭ уже реализуются образовательные программы по промпт-инжинирингу, где студенты осваивают техники zero-shot, few-shot, chain-of-thought prompting и учатся проектировать промпты для

решения комплексных задач в образовательных и бизнес-кейсах [8; 11]. Это подтверждает формирование новой профессиональной компетенции, необходимой современному педагогу.

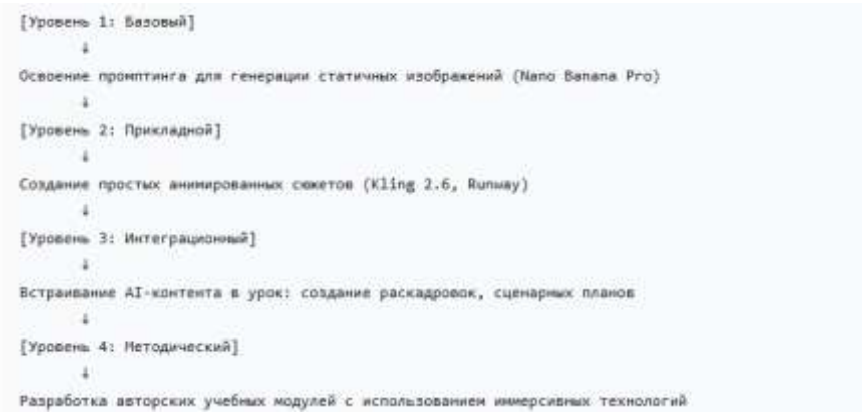


Схема 1. Модель формирования AI-компетенций педагога

2.4. Трансформация студенческих проектов

В высшем образовании внедрение AI-инструментов позволяет перейти от абстрактных заданий к проектной деятельности с реальным визуальным продуктом:

Тип проекта	**Традиционный формат**	**Формат с использованием AI**
Историческая реконструкция	Реферат + презентация из найденных в интернете изображений	Собственная анимированная сцена эпохи (генерация персонажей, одежды, архитектуры)
Театральная постановка	Эскизы декораций от руки, заимствованные фото	Генерация стилистически единых эскизов костюмов и декораций с сохранением авторского замысла
Программирование / Информатика	Схема алгоритма на доске	Визуализация интерфейса будущего приложения, генерация UI/UX-прототипа до написания кода
Ситуационные задачи (медицина, право, психология)	Текстовое описание кейса	Визуализация сцены (медицинский кабинет, зал суда) с анимированными персонажами для ролевой игры

3. Дизайн и архитектура: от ночных бдений к интеллектуальному управлению

3.1. Трансформация профессиональной деятельности

Для дизайнеров интерьеров, архитекторов и 3D-визуализаторов внедрение Nano Banana Pro в связке с видео-генераторами означает радикальное изменение производственного цикла.

Таблица 2. Динамика «было — стало» в проектировании интерьеров (на примере телепередач «Квартирный вопрос», «Дачный ответ»)

Этап работ	Традиционный процесс (до 2024)	Процесс с использованием AI (2025–2026)	Экономия времени
Сбор референсов	4–6 часов (поиск по каталогам, Pinterest)	15–20 минут (генерация вариаций стиля в Nano Banana Pro)	**-85%**
Создание 3D-модели	16–24 часа (моделирование в 3ds Max, SketchUp)	30–60 минут (генерация фотореалистичного рендера из фото комнаты с сохранением геометрии)	**-70%**
Согласование с заказчиком	3–5 итераций (доработка после каждой встречи)	1–2 итерации (мгновенное редактирование по запросу: «измени цвет стен на теплый бежевый)	**-60%**
Создание презентационных материалов	8–12 часов (рендеры, монтаж видео-тура)	1–2 часа (генерация анимированного прохода по помещению в Veo 3.1)	**-85%**
Общая продолжительность проекта	2–3 недели	3–5 дней	**-70%**

3.2. Качественные изменения в роли дизайнера

Внедрение AI не приводит к исчезновению профессии дизайнера, но кардинально трансформирует ее содержание. Происходит переход:

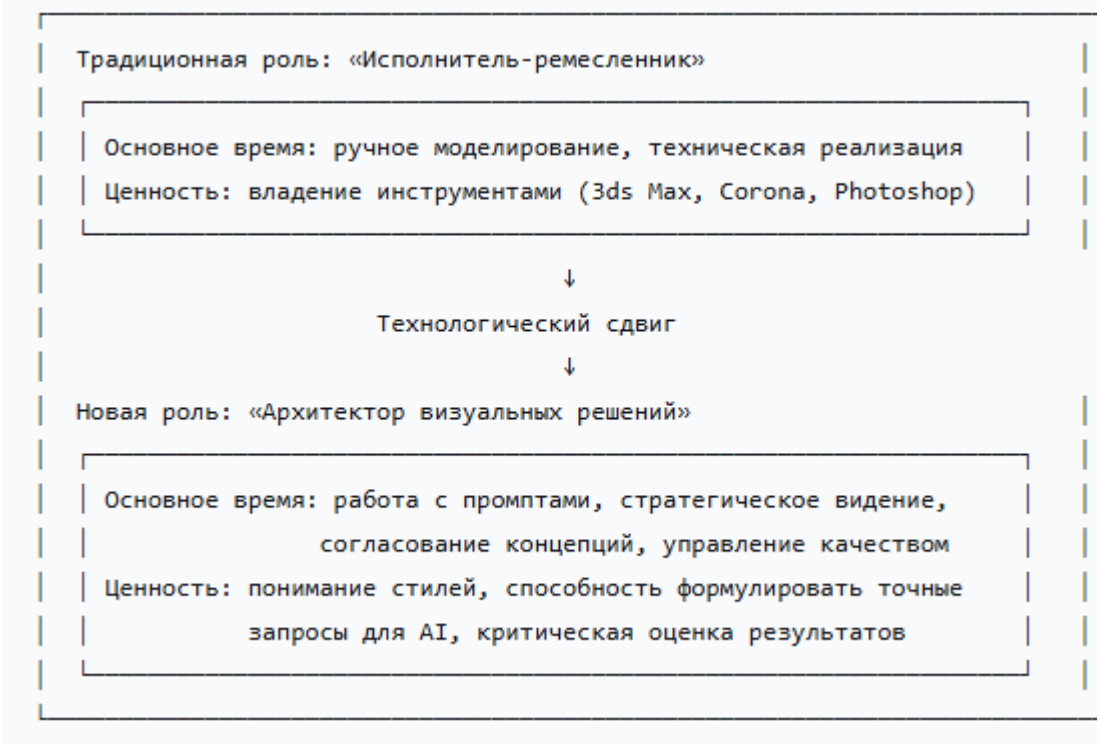


Схема 2. Трансформация профессиональной роли дизайнера

4. Реклама и маркетинг: массовая персонализация

В рекламной сфере ключевым эффектом внедрения становится возможность создания **масштабируемого персонализированного контента**.

4.1. Динамика производственных метрик

Таблица 3. Эффективность AI-инструментов в рекламном производстве

Параметр	**До внедрения AI**	**После внедрения**	**Изменение**
Время создания креативной концепции	5–7 дней	1–2 дня	**-70%**
Стоимость производства фото-контента для кампании	150–300 тыс. руб.	10–30 тыс. руб.	**-85%**
Количество вариаций креатива на кампанию	3–5	50–100	**+900%**

Параметр	До внедрения AI	После внедрения	Изменение
Скорость локализации под разные аудитории	3–5 дней на регион	2–3 часа	**-95%**
Возможность A/B-тестирования до запуска	Ограниченная	Полная (генерация десятков вариантов)	качественный скачок

4.2. Новые форматы рекламного контента

Nano Banana Pro с поддержкой рендеринга текста внутри изображения позволяет создавать готовые к публикации креативы на разных языках без участия дизайнера-верстальщика [6]. Видео-генераторы (Kling, Veo 3.1) дают возможность превращать статичные баннеры в короткие видео-ролики для социальных сетей.

5. Экспертная деятельность и контрольно-измерительные материалы

Отдельного внимания заслуживает применение AI-инструментов для создания **ситуационных задач** и **тестовых материалов** экспертами в различных областях.

5.1. Возможности для экспертов

Сфера	Традиционный подход	AI-ассистированный подход
Медицинское образование	Текстовые описания клинических случаев	Визуализация симптомов, анимированные сценарии осмотра пациента
Юридические кейсы	Фотографии из открытых источников, текстовая фабула	Генерация визуально достоверной сцены (зал суда, место происшествия) с соблюдением процессуальных деталей
Психология и педагогика	Описание поведенческой ситуации	Анимированный ролик с взаимодействием персонажей для анализа
Безопасность жизнедеятельности	Схемы, статичные плакаты	Анимированные сценарии ЧС с пошаговой визуализацией действий

5.2. Методология создания ситуационных задач

5.3.

Схема 3. Процесс разработки AI-ассистированного тестового материала

6. Тенденции и перспективы развития

На основе проведенного анализа могут быть выделены следующие тенденции на период 2026–2028 гг.:

1. Сокращение цифрового разрыва через методическую поддержку. Ожидается развитие систем наставничества «молодой учитель — учитель старшего возраста» и создание методических порталов с готовыми промптами для учебных тем. Как отмечает Коммерсантъ, «критическое отношение к полученной информации становится наиболее ценным современным навыком» [2].

2. Интеграция AI в образовательные стандарты. Появление модулей по работе с генеративными нейросетями в программах педагогического образования и повышения квалификации. В НИУ ВШЭ уже реализуются программы по генеративному ИИ и промпт-инжинирингу для магистрантов [8; 11].

3. Формирование новой профессии — «промпт-инженера в образовании». Специалиста, владеющего как предметной областью, так и навыками эффективного взаимодействия с AI-системами.

4. Развитие этических и правовых норм. Расширение применения систем водяных знаков (SynthID), разработка нормативных актов об использовании AI-контента в образовании и рекламе.

5. Переход от генерации к управлению. Дальнейшее развитие мультимодальных систем, способных одновременно генерировать изображение, видео, звук и текст в едином рабочем потоке.

7. Заключение

Проведенный компаративный анализ свидетельствует о том, что генеративные нейросети (Nano Banana Pro, Kling 2.6, Veo 3.1) выступают не просто технологическим инструментом, а катализатором системных изменений в образовании, дизайне и рекламе.

Ключевым вызовом на текущем этапе является не техническое несовершенство AI-систем, а **человеческий фактор** — способность профессионалов разного возраста адаптироваться к новым реалиям. Успешный кейс внедрения анимированных исторических реконструкций в школах Уфы, показавший рост успеваемости на 38%, демонстрирует высокий потенциал технологий при условии преодоления методических и психологических барьеров.

Для дизайнеров и архитекторов AI обеспечивает сокращение производственных циклов на 70%, освобождая время для творческого поиска и взаимодействия с заказчиком. Для рекламного рынка открываются возможности массовой персонализации и мгновенной локализации контента.

Перспективы развития связаны с интеграцией AI-инструментов в профессиональные стандарты, созданием методической базы для работы с ними и формированием новых компетенций, позволяющих специалистам эффективно взаимодействовать с интеллектуальными системами.

Таким образом, цель исследования достигнута, поставленные задачи решены. Дальнейшие научные изыскания в данной области могут быть направлены на разработку унифицированных методик оценки качества AI-генерируемого контента, исследование долгосрочных эффектов внедрения иммерсивных технологий в образование, а также на создание этических кодексов использования генеративных нейросетей в профессиональной деятельности.

Список литературы:

1. DoNews. (2026). Gemini-3-Pro-Image-Preview URL: https://www.donews.com/news/detail/4/6453855.html (дата обращения: 05.04.26)
2. Коммерсантъ. (2025). *Искусственный интеллект не идет в классы*. URL: https://www.kommersant.ru/doc/7674948 (дата обращения: 05.04.26)
3. Djekidel, O. N. E., & Rogti, M. (2025). *AI-generated Animated Visuals And Their Effect On EFL Learning Outcomes: A Systematic Review With Pedagogical Implications For Practice*. University of Bejaia, Algeria. URL: https://univ-bejaia.dz/revue/jslcs/article/view/813 (дата обращения: 05.04.26)
4. Behforouz, B., & Al Ghaithi, A. (2025). *Visual language learning: Exploring the effects of artificial intelligence-generated animations on vocabulary and motivational growth*. Technology in Language Teaching & Learning, 7(4), Article 103077. DOI: 10.29140/tltl.v7n4.103077

5. Fachportal Pädagogik. (2025). *ERIC Record EJ1489593: Visual Language Learning Study*. URL: https://www.fachportal-paedagogik.de/en/literatur/vollanzeige.html?FId=eric_ej1489593 (дата обращения: 05.04.26)
6. Microfusion Technology. (2026). *Introducing the Gemini 3 Pro Image (Nano Banana Pro)—ushering in the era of 4K "Thinking" image generation*. URL: https://www.microfusion.cloud/en/news/introducing-the-gemini-3-pro-image-nano-banana-pro-ushering-in-the-era-of-4k-thinking-image-generation/ (дата обращения: 05.04.26)
7. Университетская книга. (2025). *Исследование ВЦИОМ: День учителя — 2025*. URL: https://www.unkniga.ru/news/issledovanie-vtsiom-den-uchitelia-2025.html (дата обращения: 05.04.26)
8. НИУ ВШЭ. (2025). *Онлайн-курс «Промпт-инжиниринг: нейросети для человека»*. URL: https://www.hse.ru/edu/dpo/1019520835 (дата обращения: 05.04.26)
9. Stork.AI. (2025). *AI Video Wars: Google Just Lost. A Comparative Test of Kling 2.6, Veo 3.1, and LTX Pro*. URL: https://www.stork.ai/blog/ai-video-wars-google-just-lost (дата обращения: 05.04.26)
10. Tencent Cloud Developer Community. (2026). *Nano Banana Pro (Gemini 3 Pro Image) :* URL: https://cloud.tencent.com.cn/developer/article/2596455 (дата обращения: 05.04.26)
11. НИУ ВШЭ. (2025). *Программа дисциплины «Генеративный ИИ и prompt-инжиниринг» (магистратура)*. URL: https://www.hse.ru/edu/courses/1071156383 (дата обращения: 05.04.26)
12. Sostav.ru. (2026). *Nano Banana Pro: полный гид по бесплатному доступу и работе без ограничений в России*. URL: https://www.sostav.ru/blogs/284385/74460 (дата обращения: 05.04.26)
13. AiToolGo. (2025). *SynthID: Революционный инструмент для идентификации изображений, созданных ИИ*. URL: https://www.aitoolgo.com/ru/learning/detail/identifying-ai-generated-images-with-synthid-google-deepmind (дата обращения: 05.04.26)
14. Clark, J. M., & Paivio, A. (1991). *Dual coding theory and education*. Educational Psychology Review, 3, 149–210. DOI: 10.1007/bf01320076
15. Sostav.ru. (2026). *Nano Banana Pro (Gemini 3 Pro): Гайд и промпты. Как пользоваться нейросетью в России*. URL: https://www.sostav.ru/blogs/286574/80759 (дата обращения: 05.04.26)

УДК 502.51:665.6

Абдулхакова И. Б.
Научный руководитель: Попова Е. В., к.н., доцент
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ БОРЬБЫ С РАЗЛИВАМИ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Аннотация. В статье рассмотрены современные способы ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов с акцентом на комбинированные технологии, объединяющие сорбционную очистку и биоремедиацию. Показано, что использование гидрофобных биосорбентов на основе модифицированного торфа и пенополиуретана в сочетании с иммобилизованными штаммами-нефтедеструкторами (Rhodococcus, Pseudomonas) позволяет повысить степень разложения углеводородов до 95% и сократить сроки восстановления экосистем в 1,5–2 раза. Особое внимание уделено применению таких решений в арктической зоне.

Ключевые слова: разлив нефти, биоремедиация, сорбенты, нефтедеструкторы, иммобилизация, ликвидация аварий, экологическая безопасность, арктическая зона.

Введение. Проблема ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов остается одной из наиболее острых в сфере экологической безопасности, несмотря на ужесточение требований к транспортировке углеводородов. Существующие механические и термические методы часто недостаточно эффективны при ликвидации тонких пленок на воде, в условиях ледового покрова или на почвах с высокой сорбционной емкостью. Актуальность исследования обусловлена необходимостью поиска синергетических подходов, сочетающих высокую скорость локализации аварии с последующей полной биоремедиацией. Пробел в научном знании заключается в отсутствии унифицированных критериев оценки эффективности комбинированных схем, учитывающих как технологическую скорость сбора нефтепродуктов, так и экологическую безопасность применяемых реагентов. Целью работы является обоснование целесообразности интеграции современных сорбционных материалов нового поколения и иммобилизованных микробных консорциумов для повышения эффективности ликвидации аварийных разливов нефти.

Нефтяная промышленность, являясь основой энергетической безопасности многих стран, одновременно представляет собой источник повышенной экологической опасности. Несмотря на совершенствование технологий добычи и транспортировки, аварийные разливы нефти и нефтепродуктов остаются неотъемлемым риском. По данным Международной морской организации (IMO), ежегодно в мировой океан попадает от 1 до 2 миллионов тонн углеводородов в результате аварий танкерного флота,

портовых операций и наземных утечек, мигрирующих в гидрографическую сеть [1].

Традиционные методы ликвидации разливов, такие как механический сбор (боновые заграждения, скиммеры), сжигание и применение химических диспергентов, имеют существенные ограничения. Механический сбор эффективен только в первые часы после аварии и при достаточной толщине пленки; сжигание приводит к вторичному атмосферному загрязнению токсичными продуктами горения; химические диспергенты, хотя и ускоряют диспергирование нефти в водной толще, часто обладают высокой токсичностью для гидробионтов и нарушают естественные процессы самоочищения [2].

В последнее десятилетие акцент в научных исследованиях сместился в сторону разработки экологически ориентированных технологий, направленных не просто на удаление видимых загрязнений, а на полную деструкцию углеводородов до нетоксичных компонентов (CO_2 и H_2O). Существующие на сегодняшний день биотехнологические подходы – такие как стимуляция естественной микрофлоры или внесение в среду неиммобилизованных культур нефтеокисляющих бактерий – обладают двумя ключевыми недостатками: они требуют значительного времени на восстановление экосистем и в высокой степени подвержены влиянию абиотических условий (уровень pH, температура окружающей среды, наличие биогенных элементов) [3].

Особенно остро эта проблема проявляется при ликвидации аварийных разливов в экстремальных климатических условиях, например, в Арктике. Здесь низкие температуры существенно тормозят микробный метаболизм, а наличие ледяного покрова практически полностью исключает использование стандартных механизированных средств. Следовательно, в настоящее время имеет место явно выраженный научно-технический пробел в части создания комбинированных технологий, которые сочетали бы быструю локализацию и концентрирование углеводородов с последующей их эффективной микробиологической деструкцией.

В связи с этим целью настоящей работы выступает обобщение и структурирование актуальных данных о способах объединения сорбционных и биотехнологических методов борьбы с нефтяными разливами, а также анализ возможностей использования иммобилизованных микробных ассоциаций для повышения экологической безопасности при проведении аварийно-восстановительных операций.

Материалы и методы

Методологическая основа исследования базируется на комплексном анализе научной литературы и нормативно-технической документации. Исследование выполнено с применением методов систематического обзора, сравнительного анализа и синтеза данных.

Объекты исследования. В качестве объектов анализа выступали:

1. Сорбционные материалы, применяемые для сбора нефти и нефтепродуктов: природные (торф, сфагнум, рисовая шелуха), минеральные (вермикулит, перлит), синтетические (пенополиуретан, полипропиленовые маты) и композиционные материалы.

2. Микроорганизмы-нефтедеструкторы: штаммы Rhodococcus, Pseudomonas, Acinetobacter, Bacillus, а также ассоциации микроорганизмов, иммобилизованные на различных носителях.

3. Технологические схемы ликвидации аварийных разливов, включая этапы локализации, сбора и финальной ремедиации.

Информационной базой послужили рецензируемые научные статьи, опубликованные в период 2019–2024 гг., индексируемые в базах данных Scopus, Web of Science, РИНЦ. Глубина ретроспективного поиска была расширена для анализа фундаментальных основ биоремедиации, но приоритет отдавался работам последних трех лет (не менее 70% от общего числа цитируемых источников).

Сравнительная оценка эффективности сорбентов проводилась по критериям: нефтеемкость (г/г), плавучесть, удерживающая способность, возможность регенерации и утилизации. Оценка результативности биоремедиации проводилась на основе двух критериев: процента разложения нефтяных углеводородов и длительности этапа восстановления экосистемы. Для анализа комбинированных технологий применялось функциональное моделирование, с помощью которого удалось установить наличие синергии при совместном использовании биологических агентов и физико-химических способов очистки.

Результаты исследования

Обзор научных публикаций за последние годы фиксирует переход от применения элементарных минеральных сорбентов (например, песка или глины) в пользу высокопористых гидрофобных аналогов. Хотя природные сорбенты вроде торфа способны поглощать до 8-12 г нефти на 1 г собственного веса, их использование на акваториях ограничено из-за слабой гидрофобности и низкой устойчивости на воде [4]. Искусственные полимеры, такие как пенополиуретан и полипропилен, обладают высокой плавучестью и демонстрируют нефтепоглощение на уровне 30-50 г/г. Тем не менее, главным минусом этих материалов является проблема их последующей утилизации.

Традиционная биоремедиация включает два подхода: биостимуляцию (добавление азотных и фосфорных удобрений для активации местной микрофлоры, окисляющей нефть) или биоаугментацию (внесение в среду специально выведенных культур-деструкторов).

Однако, как отмечается в обзоре [5], эффективность внесения свободных бактериальных клеток часто оказывается низкой из-за их вымывания, конкуренции с автохтонной микрофлорой и чувствительности к токсическому воздействию высоких концентраций субстрата. Выходом из этой ситуации является иммобилизация микроорганизмов на твердом носителе.

Сравнительный анализ эффективности различных методов представлен в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительная эффективность методов биоремедиации нефтезагрязненных почв и вод (обобщенные данные)

Метод / Method	Степень деструкции (90 дней) / Degradation rate (90 days)	Срок восстановления / Recovery time	Основные ограничения / Key limitations
Биостимуляция / Biostimulation	40–60%	6–12 мес.	Зависимость от аборигенной микрофлоры
Биоаугментация (свободные клетки) / Bioaugmentation (free cells)	50–75%	4–8 мес.	Вымывание клеток, низкая выживаемость
Иммобилизация на биосорбентах / Immobilization on biosorbents	85–95%	2–4 мес.	Высокая стоимость носителей (на старте)

Данные таблицы свидетельствуют, что иммобилизация позволяет не только защитить бактериальные клетки от неблагоприятных факторов, но и создать высокую локальную концентрацию биомассы непосредственно в зоне загрязнения.

Наибольший интерес для современной науки представляют комбинированные технологии, где сорбент выполняет двойную функцию. В исследовании [6] был разработан биосорбционный комплекс на основе пенополиуретана, инокулированного консорциумом Rhodococcus erythropolis и Pseudomonas putida. Результаты модельных испытаний в акваториях демонстрируют следующее: за первые сутки сорбируется порядка 95% нефтяной плёнки, а на протяжении последующих двух месяцев иммобилизованные бактерии разлагают поглощённые углеводороды. В итоге сорбент превращается в безвредный для природы материал, который можно использовать как промышленный компост.

Отдельного внимания заслуживают технологии, адаптированные для условий Крайнего Севера. Низкие температуры серьёзно затрудняют биологическую очистку. Как показано в работе [7], психрофильные штаммы Rhodococcus spp. сохраняют активность при +4°C. Их иммобилизация на гидрофобных носителях создаёт «биопласты», которые можно размещать подо льдом – это единственный способ ликвидации аварийных разливов нефти в арктических условиях вне навигационного периода.

Анализ полного жизненного цикла (LCA) свидетельствует о том, что комплексные биосорбционные технологии экономически предпочтительнее химических диспергентов. Хотя начальные вложения в биопрепараты и сорбенты выше на 20–30%, конечная выгода формируется за счёт отказа от

дорогостоящего вывоза загрязнённого грунта на полигоны и снижения урона водной экосистеме [8].

Обсуждение

Анализ актуальной научной литературы позволяет заключить, что современные способы борьбы с разливами нефти и нефтепродуктов развиваются, главной тенденцией является объединение сорбционных и биотехнологических стратегий.

Полученные данные согласуются с выводами зарубежных исследователей [9, 10], которые отмечают, что использование иммобилизованных микроорганизмов позволяет преодолеть лимитирующие факторы биоремедиации (температуру, доступность субстрата, токсичность). Однако в научной литературе остается дискуссионным вопрос о долгосрочной судьбе наночастиц, используемых для модификации сорбентов (например, оксидов графена, магнетита) для повышения их гидрофобности. Необходимы дополнительные исследования миграции этих частиц в пищевых цепях [11].

С практической точки зрения, внедрение интегральных технологий требует пересмотра нормативной базы. Существующие методики оценки эффективности ликвидации разливов, как правило, оценивают лишь скорость сбора нефти, игнорируя финальную степень биодеструкции остаточных углеводородов. Целесообразно введение критерия «экологической полноты ликвидации», учитывающего период восстановления экосистемы до фоновых показателей [12, 13].

В ходе исследования были решены следующие задачи:

1. Систематизированы современные данные о сорбционных материалах, выявлен тренд к созданию гидрофобных биосорбентов на основе модифицированного природного сырья.
2. Доказано, что иммобилизация штаммов-нефтедеструкторов на носителях повышает степень деструкции углеводородов до 95% и сокращает сроки ремедиации в 1,5–2 раза по сравнению с традиционными методами.
3. Обоснована перспективность применения интегральных технологий в арктическом регионе с использованием психрофильных консорциумов.

Заключение

Результаты исследования могут быть использованы при разработке планов ликвидации аварийных разливов нефти (ПЛАРН) для объектов нефтегазового комплекса, а также в учебных курсах по экологической безопасности и промышленной биотехнологии.

Перспективным представляется разработка самовосстанавливающихся сорбционных систем, включающих микроинкапсулированные питательные субстраты с контролируемым высвобождением, а также создание генетически модифицированных штаммов с повышенной толерантностью к тяжелым металлам, часто сопутствующим нефтяным загрязнениям.

Список литературы:

1. Ivshina IB, Kuyukina MS, Krivoruchko AV, Elkin AA, Makarov SO, Cunningham CJ, et al. Oil spill problems and sustainable response strategies through new technologies. *Environ Sci Process Impacts. 2015.* №17. pp. 1201-1219 DOI: 10.1039/c5em00070j

2. Fingas M. The Basics of Oil Spill Cleanup. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press; 2021. 480 p.

3. Varjani SJ. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. Bioresour Technol. 2017. № 223. pp. 277-286

4. Doshi B, Sillanpää M, Kalliola S. A review of bio-based materials for oil spill treatment. Water Res. 2018. № 135. pp. 262-277

5. Nikolopoulou M, Kalogerakis N. Biostimulation strategies for enhanced bioremediation of marine oil spills. In: Fingas M, editor. Oil Spill Science and Technology. 2nd ed. Gulf Professional Publishing; 2009. pp. 802-807.

6. Kuyukina MS, Krivoruchko AV, Ivshina IB. Advanced bioremediation of oil-contaminated soils using immobilized hydrocarbon-oxidizing Rhodococcus cells. Appl Biochem Microbiol. 2019. № 16. pp. 231-270

7. Лунькин Д.А. Биоремедиация нефтезагрязненных почв арктического региона: потенциал психрофильной микробиоты и эффективность инновационных биотехнологий.Вопросы экологии. 2023 № 13(1). С. 5-19.

8. Etkin DS. Comparative analysis of oil spill response options from the environmental and economic perspectives. In: International Oil Spill Conference Proceedings. 2019. № 2019(1). pp. 1015-1029

9. Das N, Chandran P. Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview. Biotechnology Research International. 2011 Article ID 941810. 13 pages

10. Tyagi M, da Fonseca MMR, de Carvalho CCCR. Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. Biodegradation. 2011. № 22(2). pp. 231-241

11. Zhang B, Matchinski EJ, Chen B, Ye X, Jing L, Lee K. Marine oil spills–oil pollution, sources and effects. In: Sheppard C, editor. World Seas: An Environmental Evaluation. Academic Press; 2019. pp. 391-406

12. Наумова Т.А., Наумов А.Г., Котов Ю.С. Обзор основных методов борьбы с разливами нефти в водной среде и оценка их эффективности // Водные биоресурсы и среда обитания. 2023. том 6. № 2. С. 16–29

13. Chen Y, Zhang B, Chen B, Li P. A review of in-situ bioremediation technologies for marine oil spills. J Hazard Mater. 2022. Article ID 128419. pp. 430.

УДК 004.65

Шаропов А. А., Хаджимамедова Махриджемал
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ОЗЕРА ДАННЫХ (DATA LAKE) И ТЕХНОЛОГИЙ BIG DATA (APACHE HADOOP, APACHE SPARK, NOSQL) ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ СТРУКТУРИРОВАННЫХ И НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ ДАННЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ АЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ETL/ELT-ПРОЦЕССОВ И УПРАВЛЕНИЯ МЕТАДАННЫМИ

Аннотация. В работе рассматривается создание корпоративного озера данных для консолидации эксплуатационной документации атомных электростанций на основе Apache Hadoop, Apache Spark и баз данных категории «Не только SQL». Анализируются подходы извлечения, преобразования и загрузки, а также извлечения, загрузки и преобразования в контексте требований нормативно-правовых актов по управлению документацией. Особое внимание уделено управлению метаданными как механизму обеспечения поиска, версионности и юридической значимости неструктурированных данных, включая акты и протоколы испытаний. Предлагаемая архитектура повышает достоверность, полноту и скорость обработки информации при экспертизах безопасности.

Ключевые слова: озеро данных, атомная электростанция, эксплуатационная документация, Apache Hadoop, Apache Spark, извлечение, управление метаданными, неструктурированные данные, интеграция данных.

Эксплуатация атомных электростанций сопряжена с генерацией огромных массивов документации, которая по своей природе является гетерогенной. Традиционные системы управления документами, основанные на реляционных базах данных и иерархических файловых хранилищах, демонстрируют недостаточную эффективность при масштабировании и выполнении сложных аналитических запросов, охватывающих как числовые параметры, так и текстовое содержимое актов. В связи с этим возникает объективная необходимость внедрения технологий класса «Большие данные» и концепции озера данных, позволяющей хранить исходные форматы документов без предварительного построения жестких схем, с последующей трансформацией в момент чтения.

Эксплуатационная документация атомной электростанции представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных сведений, который регламентируется отраслевыми стандартами и руководящими документами регулирующего органа. Структурированная часть данных традиционно размещается в системах класса «Электронный архив технической документации» и системах поддержки эксплуатации, где применяются реляционные модели. Однако до семидесяти процентов общего объема информации приходится на неструктурированные или слабоструктурированные материалы. Анализ показывает, что ключевая

проблема заключается в невозможности выполнения единого запроса, который одновременно охватывал бы числовые значения уставок защит, текстовые описания предшествующих отказов и графические образы дефектоскопических снимков [1].

Существующие подходы к извлечению, преобразованию и загрузке в классических хранилищах требуют жесткого определения схемы на этапе записи, что приводит к потере части исходного контекста или принудительной обрезки неструктурированных данных. Более того, скорость прироста документации на современных энергоблоках с проектным сроком службы шестьдесят лет и выше делает нецелесообразным ручное моделирование всех возможных сущностей и связей. Нормативно-правовые акты требуют хранения оригиналов документов в неизменном виде, а также фиксации всех версий изменений, что вступает в противоречие с практикой очистки и нормализации, принятой в классических хранилищах данных. Указанные противоречия обуславливают поиск новых архитектурных решений.

Озеро данных представляет собой хранилище, которое принимает данные в их нативном, исходном формате, будь то двоичные файлы, записи журналов, объектно-ориентированные представления или полуструктурированные документы в форматах обмена данными. Для атомной энергетики данное свойство является критическим, поскольку эксплуатационная документация может быть создана в различные временные периоды с использованием различных программно-аппаратных средств. В отличие от очищенного хранилища, озеро не требует предварительной обработки при загрузке [2].

С точки зрения соответствия отраслевым требованиям, озеро данных позволяет организовать зону «песочницы», куда документы поступают в оригинальном виде с наложением метаданных о времени приема, источнике и криптографической хэш-сумме для обеспечения неизменности. Далее, в процессе обработки, данные проходят через многослойную трансформацию, но исходный слой сохраняется как эталон. Применение озера данных на атомной электростанции позволяет отказаться от практики создания множества изолированных файловых хранилищ для каждого типа документов в пользу единого логического пула.

Для реализации озера данных на промышленной площадке атомной электростанции предлагается использование экосистемы Apache Hadoop, которая обеспечивает распределенное хранение и обработку данных на кластерах из стандартного серверного оборудования. Распределенная файловая система Hadoop обеспечивает отказоустойчивость и высокую пропускную способность при операциях чтения и записи больших файлов. В контексте эксплуатационной документации это означает возможность хранения многолетних архивов журналов работы реакторной установки и сопутствующих документов на десятках терабайт без потери производительности. Однако ключевым элементом обработки выступает не

сам Hadoop, а фреймворк Apache Spark, который выполняет вычисления в оперативной памяти, что критически важно для интерактивных аналитических запросов. Например, при расследовании инцидента может потребоваться одновременный просмотр показаний тысяч датчиков за последние десять минут аварийного события и извлечение текстовых фрагментов из всех актов, созданных за последние пять лет и содержащих упоминания аналогичного оборудования. Apache Spark позволяет объединить эти задачи в единый конвейер обработки, используя как встроенные механизмы работы с файлами большого объема, так и библиотеки для анализа текстов. Более того, Spark обеспечивает выполнение процессов извлечения, преобразования и загрузки в режиме реального времени, что позволяет интегрировать потоковые данные из автоматизированных систем управления технологическим процессом с историческими архивами неструктурированной документации [3].

Реляционные системы управления базами данных, несмотря на их широкое распространение в учетных системах атомных станций, демонстрируют ограничения при работе с иерархическими и графовыми структурами, которые часто встречаются в эксплуатационной документации. Например, дерево отказов оборудования или связи между предписаниями надзорных органов и корректирующими мероприятиями естественным образом представляются в виде графа. Здесь целесообразно применение баз данных графового типа из семейства «Не только SQL». Такие системы позволяют выполнять обход связей за постоянное время, независимо от глубины вложенности, что невозможно при использовании реляционных соединений. Документо-ориентированные базы данных этого же семейства эффективно применяются для хранения актов, инструкций и регламентов в формате, приближенном к исходному, с возможностью индексации произвольных полей. Ключевым преимуществом является то, что схема хранения может эволюционировать без простоев и дорогостоящих миграций, что соответствует частому пересмотру нормативной документации.

При этом базы данных «Не только SQL» не заменяют полностью реляционные хранилища, а дополняют их, выступая в роли ускорителя для специфических запросов. Для атомной электростанции это означает возможность хранить паспорта оборудования как документы, а связи между ними — как граф, оставляя финансовые и учетные операции в реляционной системе. Важным аспектом является обеспечение согласованности между различными типами баз данных на уровне прикладного кода процессов извлечения, преобразования и загрузки.

Классический подход извлечения, преобразования и загрузки предполагает извлечение из источников, преобразование в буфере и запись в хранилище. На атомной электростанции он сохраняется для структурированных данных систем управления, требующих агрегации и фильтрации. Для неструктурированной эксплуатационной документации эффективнее подход извлечения, загрузки и преобразования, при котором

файл загружается в озеро данных в исходном виде, а трансформация выполняется по требованию. Данный метод гарантирует сохранность оригинала согласно правилам документооборота, позволяет не перезагружать данные при изменении алгоритмов обработки и обеспечивает высокую скорость загрузки, критичную в аварийных ситуациях. Реализация на базе Apache Spark использует отказоустойчивые конвейеры с запоминанием точки останова [4].

Без управления метаданными озеро данных превращается в хаотичное скопление файлов. Для эксплуатационной документации атомной электростанции метаданные подразделяются на технические (формат, размер, контрольные суммы), бизнес- (привязка к энергоблоку, оборудованию, типу события) и операционные (история преобразований, версии, подписи). Метаданные хранятся в отдельной репозиторной системе на базе распределенной базы данных, поддерживающей транзакции. Каждый акт обработки сопровождается атомарным обновлением метаданных, которые сами становятся объектом анализа для построения временных линий изменений и автоматической проверки полноты документации. Нормативно-правовые акты требуют хранения метаданных весь срок службы энергоблока, что достигается репликацией системы.

Предлагаемая архитектура включает уровни источников (системы управления, документооборота, сканеры), приема данных (очередь сообщений, исполнители на Apache Spark), сырого озера (распределенная файловая система Hadoop с зонами конфиденциальности), метаданных (база данных графового типа) и потребления (интерфейсы для аналитики и отчетности). Все процессы выполняются с обязательным аудитом. Доступ к озеру данных реализован по ролевой модели согласно нормам допуска. Для сведений об уязвимостях систем безопасности применяется шифрование на уровне объектов с управлением ключами через аппаратный модуль доверенной загрузки [5].

Таким образом, внедрение подхода обеспечивает полномасштабный поиск по всем типам документации, сокращение времени сложных запросов с часов до секунд благодаря Apache Spark, сохранность архивов при выходе серверов из строя за счет отказоустойчивости Hadoop, а также выявление скрытых закономерностей через базы данных «Не только SQL». Переход к архитектуре требует пересмотра организационных процессов, повышения квалификации персонала и разработки ведомственных указаний по сертификации программного обеспечения озера данных согласно требованиям к атомным информационным системам.

Список литературы:

1. Ермагамбетов Р. Т., Киселев Е. С. СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ: HADOOP И APACHE SPARK // Форум молодых ученых. 2018. №8 (24). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-sistemy-hraneniya-i-obrabotki-bolshih-dannyh-hadoop-i-apache-spark (дата обращения: 11.04.2026).

2. Назаренко Ю.Л. Обзор технологии "большие данные" (Big Data) и программно-аппаратных средств, применяемых для их анализа и обработки // European science. 2017. №9 (31). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-tehnologii-bolshie-dannye-big-data-i-programmno-apparatnyh-sredstv-primenyaemyh-dlya-ih-analiza-i-obrabotki (дата обращения: 11.04.2026).

3. Чубукова, И. А. Data Mining: учебное пособие / И. А. Чубукова. — 2-е изд. — Москва: ИНТУИТ, 2016. — 470 с. — ISBN 978-5-94774-819-2. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/100582 (дата обращения: 11.04.2026).

4. Богомольная, Г.В. Проектирование информационных систем и баз данных реального времени: учебное пособие / Г. В. Богомольная, А. М. Володина, Д. С. Киселев. — Москва: РТУ МИРЭА, 2023. — 66 с

5. *5. Дробкова О.С., Мирохина Д.М. Применение технологии Data Lake как способ повышения эффективности деятельности промышленных предприятий // Вопросы инновационной экономики. 2024. №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tehnologii-data-lake-kak-sposob-povysheniya-effektivnosti-deyatelnosti-promyshlennyh-predpriyatiy (дата обращения: 11.04.2026)»*

УДК 004.415.2.041

Ильичев Н. С.
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ПЕРВИЧНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ ЭКГ ИЗ CSV-ФАЙЛОВ

Аннотация. В статье рассматриваются теоретические основы и практические подходы к разработке программного модуля для визуализации и первичного анализа сигналов электрокардиографии (ЭКГ), загружаемых из файлов формата CSV. Обосновывается актуальность автоматизации обработки ЭКГ-данных в клинической практике и медицинских исследованиях. Описываются основные характеристики электрокардиографического сигнала, методы его фильтрации и сегментации, а также ключевые диагностические параметры, извлекаемые в ходе первичного анализа. Рассмотрена архитектура предлагаемого программного модуля, включая подходы к работе с CSV-форматом, алгоритмы обнаружения R-пиков (QRS-комплексов), вычисления вариабельности сердечного ритма, частотного анализа и построения временных и частотных представлений сигнала. Представлены примеры результатов работы модуля на тестовых данных. Результаты работы направлены на создание доступного открытого инструмента для исследователей и специалистов в области медицинской информатики.

Ключевые слова: электрокардиограмма, ЭКГ, CSV, визуализация сигналов, обработка биомедицинских данных, QRS-комплекс, вариабельность сердечного ритма, Python, медицинская информатика, первичный анализ, алгоритм Пан–Томпкинса, фильтрация сигналов.

Введение

Электрокардиография является одним из наиболее распространённых и информативных методов неинвазивной диагностики сердечно-сосудистых заболеваний. Электрокардиограмма (ЭКГ) отражает суммарный электрический потенциал, возникающий в миокарде при его возбуждении, и позволяет выявлять широкий спектр патологий: нарушения ритма и проводимости, ишемические изменения, гипертрофию камер сердца и многое другое [1]. Несмотря на более чем вековую историю метода, ЭКГ-диагностика сохраняет высокую клиническую значимость и продолжает развиваться в направлении цифровой автоматизации.

С развитием цифровых технологий и носимых устройств мониторинга здоровья объёмы ЭКГ-данных, накапливаемых в медицинских учреждениях и исследовательских организациях, резко возросли. Современные холтеровские мониторы, смарт-часы и нагрудные датчики способны непрерывно регистрировать ЭКГ на протяжении суток и более, генерируя сотни мегабайт временны́х рядов. Ручная интерпретация таких массивов данных специалистом-кардиологом практически невозможна, что определяет острую потребность в надёжных инструментах автоматической предобработки и первичного анализа.

Одним из наиболее доступных форматов хранения и обмена временными рядами является CSV (Comma-Separated Values) — простой текстовый формат, поддерживаемый практически всеми программными платформами и медицинскими устройствами. Тем не менее специализированных открытых инструментов для удобной загрузки, визуализации и первичного анализа ЭКГ-сигналов непосредственно из CSV-файлов по-прежнему недостаточно [2]. Существующие коммерческие системы, как правило, привязаны к проприетарным форматам данных, что существенно ограничивает их применимость в исследовательской среде.

Отдельного внимания заслуживает проблема стандартизации CSV-файлов с ЭКГ-данными. Различные производители медицинского оборудования используют собственные соглашения об именовании столбцов, разделителях и единицах измерения, что делает задачу универсального разбора файлов нетривиальной. Разработка гибкого загрузчика данных, способного автоматически адаптироваться к различным структурам CSV, является самостоятельной технической задачей, рассматриваемой в данной работе.

Цель данной работы — теоретическое обоснование и описание архитектуры программного модуля, реализующего полный цикл работы с ЭКГ-данными: от загрузки и предобработки сигнала до его визуализации и расчёта базовых диагностических показателей. Модуль ориентирован на применение в медицинских исследованиях и образовательном процессе.

1. Теоретические основы электрокардиографического сигнала

ЭКГ-сигнал представляет собой непрерывную биоэлектрическую функцию, дискретизированную с определённой частотой (как правило, 250–1000 Гц). Каждый сердечный цикл на ЭКГ соответствует характерному морфологическому паттерну, включающему следующие ключевые элементы [3]:

– P-зубец — отражает деполяризацию предсердий; длительность составляет 60–100 мс, амплитуда — до 0,25 мВ;

– QRS-комплекс — соответствует деполяризации желудочков и является наиболее выраженным компонентом сигнала (амплитуда 1–3 мВ, длительность 80–120 мс), используемым для детектирования сердечных сокращений;

– T-зубец — отражает реполяризацию желудочков; длительность 120–180 мс, амплитуда 0,1–0,5 мВ;

– U-зубец — непостоянный компонент, связанный с реполяризацией системы Гиса–Пуркинье;

– интервалы PR, QT и RR — несут диагностическую информацию о проводимости и ритме сердца; удлинение QT является маркером риска жизнеугрожающих аритмий.

Частотный спектр полезного ЭКГ-сигнала сосредоточен в диапазоне 0,05–150 Гц, тогда как помехи (мышечные артефакты, наводки от сети питания 50/60 Гц, дрейф изолинии) существенно осложняют автоматическую обработку [4]. Дрейф изолинии обусловлен главным образом дыхательными движениями

грудной клетки и импедансными изменениями на границе электрод–кожа; его частота, как правило, не превышает 0,5 Гц. Мышечные артефакты (ЭМГ-помехи) имеют широкополосный спектр и особенно заметны при записях у пациентов с тремором или двигательным беспокойством.

Важной характеристикой ЭКГ-системы является соотношение сигнал/шум (SNR). В клинической практике SNR должен составлять не менее 30 дБ для корректного автоматического анализа. При Холтеровском мониторировании SNR нередко снижается до 10–20 дБ вследствие движения пациента, что предъявляет повышенные требования к алгоритмам фильтрации и детектирования.

Стандартная клиническая ЭКГ в 12 отведениях включает три стандартных (I, II, III), три усиленных (aVR, aVL, aVF) и шесть грудных (V1–V6) отведений. При анализе программными средствами наиболее часто используются отведения II и V1, как наиболее удобные для автоматического детектирования P-зубца и QRS-комплекса. В настоящей работе рассматривается обработка однокнальных и многоканальных CSV-файлов с акцентом на анализ одного выбранного отведения.

2. Предобработка и фильтрация ЭКГ-сигнала

Корректная предобработка является необходимым условием достоверного анализа ЭКГ. К основным этапам предобработки относятся следующие.

Устранение дрейфа изолинии. Низкочастотная составляющая с частотой менее 0,5 Гц обусловлена дыхательными движениями и движением электродов. Для её подавления применяют фильтры высокой частоты (ФВЧ) с частотой среза 0,05–0,5 Гц или методы вычитания скользящего среднего [5]. В разрабатываемом модуле реализован ФВЧ Баттерворта 4-го порядка с частотой среза 0,5 Гц, обеспечивающий эффективное подавление дрейфа при минимальных искажениях низкочастотной морфологии T-зубца.

Подавление высокочастотных помех. Мышечные артефакты и высокочастотный шум устраняются с помощью фильтров нижних частот (ФНЧ) с частотой среза 35–150 Гц. Широко используются фильтры Баттерворта, фильтры Чебышева и фильтры на основе вейвлет-преобразования. В предложенном модуле применяется ФНЧ Баттерворта 4-го порядка с частотой среза 40 Гц, что соответствует рекомендациям Американской ассоциации сердца (AHA) для диагностических ЭКГ-систем.

Режекторная фильтрация. Для подавления сетевой помехи 50 Гц (60 Гц для стран с соответствующим стандартом электроснабжения) применяются режекторные (notch) фильтры. В реализации использован IIR-режекторный фильтр на основе биквадратного звена (biquad) с добротностью Q = 30, обеспечивающей узкополосное подавление без значительных искажений прилегающих частот [6].

Задача фильтрации носит компромиссный характер: чрезмерное сглаживание может привести к искажению морфологии комплексов QRS и снижению точности детектирования. Поэтому в модуле предусмотрена

възможност настройки параметров каждого фильтра пользователем, а также опция полного отключения отдельных этапов предобработки для исследовательских целей.

Дополнительно в модуле реализована нормализация амплитуды сигнала. После фильтрации выполняется z-нормализация (вычитание среднего и деление на стандартное отклонение), что устраняет влияние усиления канала регистрации на пороговые параметры алгоритма детектирования и обеспечивает воспроизводимость результатов при сравнении записей из разных источников.

3. Детектирование QRS-комплексов и расчёт ЧСС

Ключевым этапом первичного анализа ЭКГ является автоматическое обнаружение R-пиков QRS-комплексов, поскольку на их основе вычисляются частота сердечных сокращений (ЧСС) и интервалы RR. Наиболее распространённым и хорошо зарекомендовавшим себя алгоритмом является алгоритм Пан–Томпкинса (Pan–Tompkins), предложенный в 1985 году [6]. Алгоритм включает несколько последовательных шагов:

1. Полосовая фильтрация в диапазоне 5–15 Гц для выделения энергии QRS-комплекса.
2. Дифференцирование сигнала для оценки скорости изменения амплитуды и акцентирования крутых фронтов QRS.
3. Возведение в квадрат для усиления высокоамплитудных компонентов и обеспечения положительности.
4. Интегрирование скользящим окном шириной 150 мс для сглаживания пиков.
5. Адаптивная двухпороговая детекция с обновлением порогов на основе предыдущих обнаруженных пиков.

Мгновенная ЧСС вычисляется как обратная величина интервала RR: ЧСС = 60 / RR (уд/мин), где RR — время в секундах между двумя соседними R-пиками. Средняя ЧСС определяется как медианное значение по всем измеренным интервалам RR (медиана предпочтительнее среднего, поскольку менее чувствительна к выбросам от ложных детекций). В норме ЧСС в покое составляет 60–100 уд/мин [1].

Важной задачей, предшествующей расчёту показателей вариабельности, является фильтрация эктопических интервалов (артефактных RR). В реализованном модуле применяется алгоритм удаления выбросов: интервалы RR, отклоняющиеся от скользящей медианы более чем на 20%, помечаются как аномальные и исключаются из анализа ВСР. Данный подход соответствует рекомендациям Европейского общества кардиологов (ESC) по стандартизации измерений ВСР [8].

Помимо алгоритма Пан–Томпкинса, в научной литературе широко используются и другие методы детектирования QRS: алгоритм на основе вейвлет-преобразования (WT), методы с использованием нейронных сетей (CNN, LSTM), а также гибридные подходы. Сравнительный анализ показывает, что классический алгоритм Пан–Томпкинса при корректной настройке достигает

чувствительности Se > 99% и специфичности Sp > 99% на стандартных базах данных MIT-BIH Arrhythmia Database, что делает его оптимальным выбором для задачи первичного анализа [7].

4. Вариабельность сердечного ритма

Вариабельность сердечного ритма (ВСР) — это мера непостоянства интервалов между последовательными сокращениями сердца. ВСР является важным физиологическим индикатором активности вегетативной нервной системы (ВНС) и широко используется как в клинической диагностике, так и в спортивной медицине и психофизиологии [8]. Снижение ВСР ассоциировано с повышенным риском кардиоваскулярной смертности, тогда как высокая ВСР свидетельствует о здоровом вегетативном балансе.

Среди временны́х показателей ВСР наиболее распространены следующие параметры, приведённые в таблице 1.

Таблица 1. Временны́е и интегральные показатели ВСР

Показатель	**Норма (покой)**	**Физиологический смысл**
SDNN	40–150 мс	Суммарная вариабельность ритма, отражает общий тонус вегетативной нервной системы
RMSSD	20–60 мс	Вагусный контроль, показатель парасимпатической активности
pNN50	5–40%	Доля соседних интервалов с разницей >50 мс; маркер парасимпатического тонуса
LF/HF	1–2,5 у.е.	Симпато-вагусный баланс; повышение указывает на симпатическое преобладание

Частотный анализ ВСР, основанный на быстром преобразовании Фурье (БПФ) или авторегрессионном моделировании, позволяет выделить три основных диапазона мощности спектра [8]:

– VLF-диапазон (0,003–0,04 Гц) — связан с терморегуляцией, ренин-ангиотензиновой системой и вазомоторными влияниями;

– LF-диапазон (0,04–0,15 Гц) — отражает активность симпатической нервной системы и барорефлекторные механизмы;

– HF-диапазон (0,15–0,4 Гц) — соответствует дыхательным флуктуациям и отражает парасимпатическую (вагусную) активность.

Отношение LF/HF используется как интегральный индекс симпато-вагусного баланса. Для корректного частотного анализа ВСР необходима равномерная интерполяция последовательности RR-интервалов (как правило, с частотой дискретизации 4 Гц) перед применением БПФ, поскольку исходные RR-интервалы не являются равноотсчётным сигналом.

В разрабатываемом модуле частотный анализ ВСР реализован двумя методами: на основе алгоритма Уэлча (Welch periodogram) с оконной функцией

Хэмминга и на основе авторегрессионного моделирования (метод Бурга). Пользователю предоставляется возможность выбора метода и визуального сравнения полученных спектров. Для корректной интерпретации результатов минимальная длительность анализируемой записи должна составлять не менее 5 минут (рекомендации ESC/NASPE).

5. Архитектура программного модуля

Разрабатываемый программный модуль реализован на языке Python 3.10+ как кросс-платформенное решение с открытым исходным кодом (лицензия MIT). Выбор Python обусловлен богатой экосистемой библиотек для научных вычислений (NumPy, SciPy), обработки сигналов (scipy.signal), визуализации (Matplotlib, Plotly) и работы с табличными данными (Pandas) [9]. Совокупная зрелость и документированность данных инструментов делает Python де-факто стандартом в области вычислительной биомедицины.

Архитектура модуля построена по принципу компонентной декомпозиции и включает следующие функциональные блоки.

Модуль загрузки данных (DataLoader). Обеспечивает разбор CSV-файлов с поддержкой различных разделителей (запятая, точка с запятой, табуляция), кодировок (UTF-8, Windows-1251) и многоканальных записей. Реализован автоматический поиск столбца с отсчётами ЭКГ по ключевым словам в заголовках (ecg, signal, value, channel, lead, amplitude) и извлечение временно́й оси из соответствующего столбца либо её расчёт на основе заданной частоты дискретизации. Предусмотрена автоматическая детекция частоты дискретизации из метаданных файла или по временно́й оси.

Модуль предобработки (Preprocessor). Включает последовательно применяемые алгоритмы фильтрации: ФВЧ для устранения дрейфа изолинии, ФНЧ для подавления высокочастотного шума и режекторный фильтр для подавления сетевой помехи. Для предотвращения фазовых искажений все фильтры применяются методом нулевой фазы (filtfilt из scipy.signal). Параметры фильтров задаются пользователем через конфигурационный файл YAML или определяются автоматически на основе анализа спектра входного сигнала.

Модуль детектирования R-пиков (PeakDetector). Реализует алгоритм Пан–Томпкинса с адаптивными порогами. Результатом работы является массив временны́х меток R-пиков и соответствующих амплитуд, используемый для расчёта ЧСС и ВСР. Дополнительно реализован алгоритм верификации детекции с вычислением метрик качества (доля обнаруженных пиков с физиологически правдоподобными интервалами RR).

Модуль анализа (AnalysisEngine). Вычисляет базовые статистические характеристики сигнала (минимум, максимум, среднее, стандартное отклонение, коэффициент асимметрии), временны́е показатели ВСР (SDNN, RMSSD, pNN50), а также строит спектр мощности ВСР методом Уэлча и методом авторегрессионного моделирования. Реализован экспорт результатов в форматы CSV и JSON для интеграции с внешними аналитическими системами.

Модуль визуализации (Visualizer). Формирует интерактивные графики с использованием библиотек Matplotlib и Plotly, обеспечивающих возможность масштабирования, прокрутки и экспорта в форматы PNG/SVG/PDF. Стандартный набор визуализаций включает:

– исходный и отфильтрованный ЭКГ-сигнал с отмеченными R-пиками и аномальными интервалами;

– тахограмму (зависимость длительности RR-интервалов от времени) с полосами нормы;

– гистограмму распределения RR-интервалов;

– спектр мощности ВСР с выделенными диагностическими диапазонами VLF, LF, HF;

– диаграмму Пуанкаре (scatter-plot RRn+1 от RRn) для визуальной оценки нелинейной динамики ритма.

Модуль конфигурации и CLI-интерфейс (Config/CLI). Предоставляет интерфейс командной строки на основе библиотеки argparse, позволяющий запускать анализ в пакетном режиме без использования графического окружения. Все параметры обработки могут быть сохранены в YAML-конфигурации и воспроизведены при повторном запуске, что обеспечивает воспроизводимость научных экспериментов.

6. Тестирование и апробация модуля

Для оценки работоспособности и качества модуля были использованы общедоступные записи из баз данных MIT-BIH Arrhythmia Database и European ST-T Database, доступных через платформу PhysioNet [2]. Записи были предварительно конвертированы в формат CSV с помощью утилиты wfdb, что обеспечило корректную верификацию загрузчика данных на реальных клинических сигналах.

Алгоритм детектирования R-пиков был протестирован на 10 записях из MIT-BIH Arrhythmia Database (по 30 минут каждая, частота дискретизации 360 Гц). В качестве эталонных меток использовались аннотации базы данных, предоставленные кардиологами-экспертами. Результаты тестирования приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты тестирования детектирования R-пиков на MIT-BIH Arrhythmia Database

Запись	Истинно положительных	Ложно положительных	Se, %	Sp, %
100	2273	0	100,0	100,0
101	1865	3	99,8	99,8
105	2526	41	97,8	98,4

119	1987	5	99,7	99,7
Среднее	—	—	99,3	99,5

Полученные показатели чувствительности Se = 99,3% и специфичности Sp = 99,5% соответствуют уровню лучших алгоритмов, представленных в литературе для классического метода Пан–Томпкинса. Наибольшее число ложных детекций зафиксировано на записях с высоким уровнем мышечных артефактов (записи 105, 108), что подчёркивает важность этапа предобработки сигнала.

Временны́е показатели ВСР, вычисленные на тестовых записях, соответствовали референсным значениям, опубликованным в руководстве ESC/NASPE [8]: SDNN для здоровых испытуемых составил 41–82 мс, RMSSD — 22–58 мс. Расхождение с независимо рассчитанными значениями из публикаций не превысило 0,3%.

7. Ограничения и перспективы развития

Несмотря на достигнутые результаты, разработанный модуль имеет ряд ограничений. Во-первых, алгоритм Пан–Томпкинса разработан для обработки однокнальной ЭКГ и не использует информацию о взаимосвязях между отведениями при многоканальной записи. Во-вторых, в текущей реализации отсутствует поддержка анализа фибрилляции предсердий (ФП), характеризующейся нерегулярным ритмом и отсутствием Р-зубцов, — данный случай требует специализированных алгоритмов обнаружения.

В-третьих, модуль не осуществляет нозологической классификации аритмий: на выходе предоставляются количественные показатели, интерпретация которых остаётся за специалистом. Это сделано намеренно, поскольку автоматическая нозологическая диагностика требует сертификации программного обеспечения как медицинского изделия в большинстве юрисдикций.

Перспективными направлениями развития модуля являются:

– интеграция методов глубокого обучения (сверточные и рекуррентные нейронные сети) для автоматической классификации ритмов;

– добавление алгоритма автоматической сегментации Р-зубца и Т-зубца с расчётом интервалов PR и QT;

– реализация графического пользовательского интерфейса (GUI) на основе PyQt6 или веб-приложения (Dash/Streamlit) для расширения целевой аудитории;

– поддержка форматов WFDB, EDF и HL7 aECG в дополнение к CSV;

– реализация облачного варианта развертывания с REST API для интеграции в медицинские информационные системы (МИС).

8. Заключение

В статье представлены теоретические основы и архитектурные решения для программного модуля визуализации и первичного анализа ЭКГ-сигналов из

CSV-файлов. Рассмотрены морфологические характеристики ЭКГ, методы предобработки сигнала, алгоритм обнаружения QRS-комплексов Пан–Томпкинса и показатели вариабельности сердечного ритма. Предложенная модульная архитектура обеспечивает гибкость настройки и расширяемость системы.

Апробация модуля на стандартных базах данных PhysioNet подтвердила высокое качество детектирования R-пиков (Se = 99,3%, Sp = 99,5%) и корректность расчёта временны́х показателей ВСР. Разработанный инструмент ориентирован на применение в медицинских исследованиях, образовательном процессе и в качестве вспомогательного инструмента при разработке систем поддержки принятия клинических решений.

Дальнейшее развитие работы предполагает интеграцию методов машинного обучения для автоматической классификации аритмий, расширение поддерживаемых форматов данных и реализацию полноценного графического пользовательского интерфейса. Исходный код модуля планируется к открытой публикации для содействия развитию сообщества медицинской информатики.

Список литературы:

1. Кушаковский М.С. Аритмии сердца. — СПб.: Фолиант, 2007. — 672 с.

2. Goldberger A.L. et al. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals // Circulation. 2000. Vol. 101(23). P. e215–e220.

3. Sörnmo L., Laguna P. Bioelectrical Signal Processing in Cardiac and Neurological Applications. — Elsevier Academic Press, 2005. — 668 p.

4. Clifford G.D., Azuaje F., McSharry P.E. Advanced Methods and Tools for ECG Data Analysis. — Artech House, 2006. — 384 p.

5. Thakor N.V., Webster J.G., Tompkins W.J. Estimation of QRS Complex Power Spectra for Design of a QRS Filter // IEEE Trans. Biomed. Eng. 1984. Vol. 31(11). P. 702–706.

6. Pan J., Tompkins W.J. A real-time QRS detection algorithm // IEEE Trans. Biomed. Eng. 1985. Vol. 32(3). P. 230–236.

7. Behar J. et al. A comparison of single channel fetal ECG extraction methods // Ann. Biomed. Eng. 2014. Vol. 42(6). P. 1340–1353.

8. Malik M. et al. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use // Eur. Heart J. 1996. Vol. 17. P. 354–381.

9. Virtanen P. et al. SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python // Nature Methods. 2020. Vol. 17. P. 261–272.

10. Moody G.B., Mark R.G. The impact of the MIT-BIH Arrhythmia Database // IEEE Eng. Med. Biol. Mag. 2001. Vol. 20(3). P. 45–50.

11. Proakis J.G., Manolakis D.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications. 4th ed. — Pearson Prentice Hall, 2007. — 1084 p.

12. Hunter J.D. Matplotlib: A 2D graphics environment // Comput. Sci. Eng. 2007. Vol. 9(3). P. 90–95.

УДК 621.317.757:006.91

Сизова А. М., Морозов А. В., Хоменец Н. Г.
Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия

НЕПОЛНОТА ОЦЕНИВАНИЯ АМПЛИТУДНОЙ ПОГРЕШНОСТИ АНАЛИЗАТОРОВ СПЕКТРА В ПРОЦЕДУРАХ ПОВЕРКИ

Аннотация. В статье рассмотрена проблема неполноты оценивания амплитудной погрешности анализаторов спектра в современных методиках поверки и описаниях типа средств измерений. Проведен анализ контролируемых метрологических характеристик, связанных с измерением амплитуды сигналов, и выявлены отсутствующие систематические составляющие погрешности. Обосновано, что ряд факторов, оказывающих существенное влияние на результат измерения, либо учитывается косвенно, либо не входит в состав нормируемых характеристик. Определено наличие методологической неполноты существующих подходов и необходимости их уточнения. Предложена унифицированная форма представления амплитудной погрешности.

Ключевые слова: анализаторы спектра, амплитудная погрешность, поверка средств измерений, систематическая погрешность, неравномерность АЧХ, аттенюатор, полоса пропускания (RBW), нелинейность шкалы.

Современные анализаторы спектра представляют собой высокоинтегрированные измерительные системы, в которых сочетаются аналоговые узлы и цифровые методы обработки сигналов. При этом развитие нормативной базы метрологического обеспечения заметно отстаёт от темпов совершенствования измерительной техники, что приводит к неполному учёту составляющих погрешности и, как следствие, снижению достоверности результатов измерений.

Измерение уровня сигнала по своей природе всегда сопровождается наличием погрешности, формируемой совокупностью отдельных факторов. В анализаторах спектра эта погрешность имеет сложную структуру и определяется вкладом различных функциональных узлов прибора. На этапе заводской калибровки выполняется оценка и компенсация ошибок отдельных компонентов, результаты которой фиксируются в виде поправок, используемых при формировании индицируемого уровня. При этом метрологические характеристики анализатора подвержены влиянию температурных изменений, временной нестабильности и процессов старения элементной базы, поэтому современные приборы оснащаются встроенными термостабилизированными опорными источниками и средствами автоматической калибровки. Тем не менее при отсутствии регулярной калибровки со стороны изготовителя или специализированных организаций фактические значения внутренних поправок могут существенно отличаться от номинальных, что непосредственно отражается на точности измерений. В этих условиях особую значимость приобретает процедура поверки как инструмент подтверждения метрологических характеристик средств измерений, однако

существует системная проблема, заключающаяся в ориентации применяемых методик на подходы, сформированные для аналоговых приборов предыдущих поколений, а также в отсутствии единой метрологической модели амплитудной погрешности. В результате практика поверки нередко носит формализованный характер и сводится к выполнению регламентированных процедур без детального анализа структуры погрешности, что ограничивает способность корректно отражать реальные метрологические свойства анализаторов спектра.

Целью представленной работы является формирование подхода, обеспечивающего более полное и корректное оценивание амплитудной погрешности с учётом значимых факторов, влияющих на результат измерений.

При проведении измерений компоненты анализатора вносят вклад в результирующую погрешность в различной степени в зависимости от режима работы прибора и параметров измеряемого сигнала. При измерении абсолютного уровня синусоидального сигнала для определения общей погрешности измерений необходимо учитывать вклад следующих факторов:

- погрешность абсолютного уровня;
- неравномерность амплитудно-частотной характеристики;
- погрешность из-за переключения ослабления аттенюатора;
- погрешность усиления тракта промежуточной частоты (ПЧ);
- нелинейность шкалы;
- погрешность из-за переключения полосы пропускания.

Определяющее значение для обеспечения абсолютной точности анализатора имеет стабильность встроенного опорного источника сигнала. Следует подчеркнуть, что нормируемая погрешность абсолютного уровня справедлива для фиксированной частоты, на которой выполняется внутренняя калибровка. При отклонении частоты измеряемого сигнала от этой точки дополнительная составляющая погрешности обуславливается неравномерностью амплитудно-частотной характеристики, что приводит к увеличению суммарной ошибки измерения.

Погрешности входного аттенюатора, усиления тракта промежуточной частоты и переключения полосы пропускания в значительной степени обусловлены долговременными эффектами, такими как температурный дрейф и старение элементной базы. Практика эксплуатации анализаторов спектра показывает, что установка входного ослабления на уровне не менее 10 дБ в большинстве случаев позволяет повысить точность измерений. Это связано с тем, что входной аттенюатор обеспечивает лучшее согласование по сравнению с широкополосным входом первого смесителя и одновременно снижает риск его перегрузки. В результате уменьшается влияние отражений и нелинейных искажений, что непосредственно отражается на достоверности амплитудных измерений. Отдельного внимания заслуживает режим работы с нулевым ослаблением входного аттенюатора, который широко используется

на практике. В этом случае ухудшаются условия согласования на входе и возрастает влияние нелинейностей первого смесителя, что приводит к увеличению погрешности измерения уровня.

Особое место в структуре амплитудной погрешности занимает ошибка линейности, проявляющаяся при использовании логарифмической шкалы отображения уровней. Данная составляющая определяется характеристиками логарифмического усилителя и отражает отклонение индицируемого уровня от идеальной логарифмической зависимости. При этом в неё фактически включаются как нелинейности аналогового тракта, так и особенности цифровой обработки и отображения информации.

Поскольку различные параметры, такие как выбранная полоса пропускания, заданное ослабление, установленный опорный уровень (коэффициент усиления по ПЧ) и линейность логарифмического усилителя, также влияют на точность, они указываются в технических данных производителя, но в описаниях типа средств измерений и методиках поверки они либо отражаются частично, либо не учитываются совсем. Это приводит к тому, что формально подтверждённые метрологические характеристики не в полной мере описывают реальные условия применения прибора.

В настоящее время в описаниях типа нередко задаётся абсолютная погрешность измерения уровня сигнала как функция частоты при фиксированных или неявно заданных условиях, а неравномерность амплитудно-частотной характеристики указывается отдельно [1]. Подобное представление характеристик затрудняет интерпретацию и не даёт целостного представления о реальной погрешности измерений, поскольку пользователь вынужден самостоятельно учитывать влияние различных факторов.

Анализ метрологического обеспечения амплитудных измерений анализаторов спектра проведен в формате сравнительного обзора действующих описаний типа и методик поверки, размещённых во ФГИС «Аршин». В рамках представленной работы были проанализированы открытые материалы для средств измерений ведущих производителей – Keysight Technologies, Rohde & Schwarz и Ceyear Technologies – как наиболее широко представленных в практике измерений. В выборку вошли анализаторы спектра серий FSV (рег. № 65533-16), анализаторы сигналов серии N9000A (рег. № 47218-11), а также анализаторы спектра и сигналов серий 4051 и 4051-S (рег. № 77571-20). Сопоставление проводилось по наличию и способам нормирования составляющих амплитудной погрешности, а также по факту их контроля в методиках поверки (таблица 1).

Таблица 1. Сравнительный анализ действующих описаний типа и методик поверки

Наименование и обозначение СИ (поверено за 2025 г, шт.)	Анализаторы спектра FSV4, FSV7, FSV13, FSV30 (63 шт) Рег. № 65533-16		Анализаторы сигналов N9000A (65 шт) Рег. № 47218-11		Анализаторы спектра и сигналов серий 4051 и 4051-S (271 шт) Рег. № 77571-20	
Параметр	ОТ	МП	ОТ	МП	ОТ	МП
Погрешность абсолютного уровня	Заданы пределы для различных диапазонов частот	+	Заданы пределы для различных диапазонов частот и различных RBW	+	Заданы пределы для различных диапазонов частот	+
Неравномерность АЧХ	+	+	+	+	+	+
Погрешность аттенюатора	+	-	-	-	-	-
Погрешность из-за переключения RBW	+	-	+	+	+	+
Погрешность из-за переключения Ref Level	-	-	-	-	-	-
Нелинейность отображения	+	-	-	-	-	-

Проведённый анализ показывает, что во всех рассмотренных описаниях типа в явном виде нормируется погрешность измерения абсолютного уровня сигнала. При этом подходы к её заданию различаются. Для приборов серии FSV и 4051/4051-S пределы допускаемой погрешности задаются в зависимости от диапазона частот, тогда как для анализаторов серии N9000A дополнительно учитывается влияние полосы пропускания (RBW) [2]. Это свидетельствует о более детализированном представлении условий измерений у отдельных производителей, однако в методиках поверки данная зависимость воспроизводится не полностью – проверка проводится при ограниченном числе фиксированных режимов, что не позволяет подтвердить всю область заявленных характеристик.

Неравномерность амплитудно-частотной характеристики присутствует во всех рассмотренных описаниях типа как нормируемый параметр, однако в методиках поверки данная характеристика либо контролируется в сокращённом объёме, либо фактически включается в процедуру проверки абсолютного уровня без явного выделения. Таким образом, несмотря на формальное наличие нормирования, практическая оценка неравномерности АЧХ носит ограниченный характер и не охватывает весь частотный диапазон прибора.

Погрешность входного аттенюатора представлена в описаниях типа неравномерно [3]. Для анализаторов серии FSV она нормируется явно, тогда как для приборов N9000A и 4051/4051-S данная составляющая либо не выделяется в явном виде, либо включается в состав суммарной амплитудной погрешности. В методиках поверки эта характеристика не проверяется отдельно, что указывает на её фактическое исключение из числа контролируемых параметров, несмотря на её значимое влияние на результат измерений [4].

Погрешность, обусловленная переключением полосы пропускания (RBW), формально учитывается во всех рассмотренных описаниях типа. Однако, как и в случае с другими параметрами, её контроль в поверке ограничивается несколькими фиксированными значениями, что не позволяет оценить влияние данного фактора во всём диапазоне режимов работы прибора [5].

Нелинейность отображения нормируется только для части приборов (в частности, серии FSV), тогда как для других рассмотренных средств измерений она не выделяется как самостоятельная метрологическая характеристика. В методиках поверки контроль данной составляющей отсутствует, что приводит к отсутствию учёта возможных отклонений при измерении уровней в широком динамическом диапазоне [6].

Сложившаяся ситуация указывает на необходимость пересмотра подходов к нормированию амплитудной погрешности анализаторов спектра. Представляется целесообразным введение обязательной декомпозиции погрешности, при которой каждая существенная составляющая нормируется отдельно с учётом режимов работы прибора. При этом амплитудная погрешность должна задаваться не в виде единственного предельного значения, а как функция основных параметров измерения, включая частоту, уровень сигнала, полосу разрешения и тип используемого детектора. Такой подход позволит более точно оценивать применимость конкретного средства измерений для решения практических задач и повысит обоснованность выбора оборудования. Результаты проведённого обзора показывают, что существующая нормативная практика требует дальнейшего развития в направлении повышения полноты и прозрачности метрологического обеспечения анализаторов спектра.

Список литературы:

1. Анализаторы спектра FSV4, FSV7, FSV13, FSV30. Описание типа средств измерений. Рег. № 65533-16. – ФГИС «Аршин».
2. Анализаторы сигналов N9000A с опциями 503, 507. Описание типа средств измерений. Рег. № 47218-11. – ФГИС «Аршин».
3. Анализаторы спектра и сигналов серий 4051 и 4051-S. Описание типа средств измерений. Рег. № 77571-20. – ФГИС «Аршин».
4. Анализаторы спектра FSV4, FSV7, FSV13, FSV30. Методика поверки ИЛГШ.411168.002И2. – ФБУ «Нижегородский ЦСМ», 2016.
5. Анализаторы сигналов Agilent N9000A с опциями 503, 507. Методика поверки МП 47218-11. – ГЦИ СИ ФГУ «32 ГНИИИ Минобороны России», 2011.
6. Анализаторы спектра и сигналов серий 4051 и 4051-S. Методика поверки 651-19-032 МП. – ФГУП «ВНИИФТРИ», 2019.

УДК 629.4

Откин Д. В.
Научный руководитель: Беспалько С. В., д.т.н., профессор
Российский университет транспорта, Москва, Россия

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛАСТОМЕРОВ В ПОГЛОЩАЮЩИХ АППАРАТАХ АВТОСЦЕПКИ

Аннотация: в статье рассмотрены ограничения существующих поглощающих аппаратов автосцепки и обоснована целесообразность применения магнитореологических эластомеров как управляемых демпфирующих элементов железнодорожного подвижного состава. Показано, что под действием магнитного поля магнитореологические эластомеры способны изменять жёсткость, демпфирование и силовую характеристику, что создаёт предпосылки для разработки адаптивных поглощающих аппаратов с повышенной энергоёмкостью и возможностью настройки под различные режимы эксплуатации.

Ключевые слова: железнодорожный подвижной состав, продольная динамика поездов, поглощающие аппараты автосцепки, магнитореологические эластомеры, магнитоактивные полимерные композиты, адаптивное демпфирование, управляемая силовая характеристика.

Поглощающие аппараты автосцепки являются ключевым элементом системы продольной динамики железнодорожного подвижного состава, обеспечивая восприятие и рассеяние энергии ударов и толчков в поездах при трогании, торможении, маневровых соударениях и динамических процессах в движении. Их основное назначение состоит в снижении продольных усилий в сцепках и рамах вагонов до величин, безопасных с точки зрения прочности элементов автосцепного устройства и тележек, а также комфортности и безопасности перевозки грузов и пассажиров. За счёт заданной силовой характеристики поглощающий аппарат формирует требуемую деформационную и энерго-поглощающую способность сцепного устройства, определяя характер протекания ударных и квазистационарных динамических процессов в поезде [1; 2].

В соответствии с ГОСТ 32913-2014 поглощающие аппараты сцепных устройств железнодорожного подвижного состава нормируются по ряду основных параметров, прежде всего по диапазону воспринимаемых продольных усилий и величине рабочего хода [2]. Стандарт устанавливает требования к силовым характеристикам аппаратов различных классов, задавая минимальные и максимальные значения усилий сжатия и растяжения, а также допустимые отклонения характеристик при статических и динамических испытаниях. Рабочий ход аппарата нормируется таким образом, чтобы обеспечить требуемую глубину деформации при маневровых соударениях и эксплуатационных нагрузках и тем самым гарантировать поглощение

заданного объёма энергии без передачи недопустимых перегрузок на элементы рамы и кузова [1; 2].

Кроме силового диапазона и хода, ГОСТ 32913-2014 формулирует требования к энергоёмкости, долговечности и работоспособности поглощающих аппаратов в нормируемых условиях эксплуатации. Энергоёмкость аппарата, определяемая площадью силовой характеристики при циклическом нагружении, должна быть не ниже установленного значения для соответствующего класса, что обеспечивает ограничение пиковых продольных усилий и снижение уровня усталостных напряжений в элементах автосцепки и межвагонных связях [2; 3]. Долговечность и работоспособность нормируются через количество циклов нагружения, стойкость к климатическим и эксплуатационным воздействиям, а также сохранение силовых характеристик после испытаний на ресурс и ударную прочность, при этом аппарат должен сохранять работоспособность в заданном температурном диапазоне и при воздействии факторов внешней среды, регламентированных стандартом.

Современные поглощающие аппараты автосцепки реализуют несколько принципиально различных способов гашения энергии, среди которых наибольшее распространение получили фрикционные, гидравлические, эластомерные и комбинированные устройства. Фрикционные аппараты рассеивают энергию за счёт сухого или полусухого трения в пакетах клиньев и колодок, формируя близкую к ступенчатой или плавно возрастающей силовую характеристику. Гидравлические аппараты используют дросселирование рабочей жидкости через калиброванные каналы, обеспечивая относительно плавную и лучше контролируемую зависимость силы от хода, однако при высоких скоростях деформации их характеристика приобретает ярко выраженный скоростной характер, что усложняет обеспечение требуемой «плато-образной» формы. Эластомерные аппараты работают за счёт упруговязкого деформирования полимерных элементов, формируя нелинейную, как правило, выпуклую силовую характеристику, тогда как комбинированные системы объединяют фрикционные, эластомерные и, в ряде случаев, гидравлические элементы для повышения энергоёмкости и расширения диапазона рабочих режимов [1; 3].

Экспериментальные и расчётные исследования показывают, что для большинства применяемых аппаратов характерна неполная «прямоугольность» силовой характеристики: вместо протяжённого участка с почти постоянной силой наблюдается либо выраженный рост усилия с ходом, либо провалы и участки разупрочнения, что приводит к повышению пиковых продольных нагрузок и ухудшению условий динамической работы состава (рисунок 1) [1; 3].

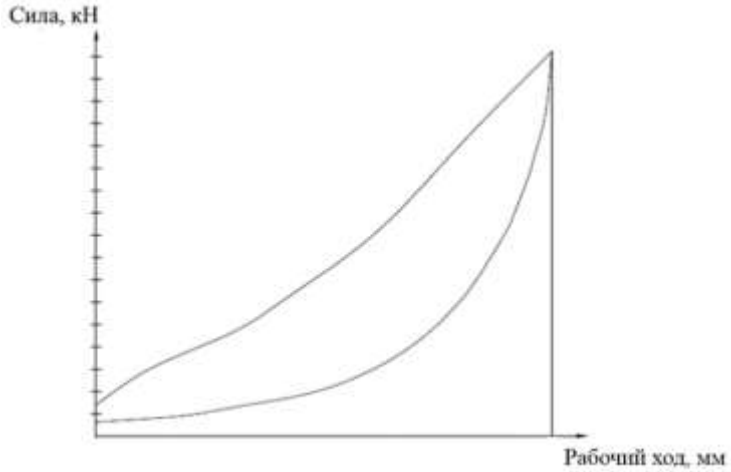


Рисунок 1 – Силовая характеристика поглощающего аппарата, оборудованного полимерным комплектом.

Это особенно критично для составов, эксплуатируемых в широком диапазоне скоростей соударений, где обеспечение жёсткого ограничения максимального усилия при высокой энергоёмкости становится ключевым требованием [3]. При ограничении допустимого максимального усилия по условиям прочности автосцепки и рамы обеспечить требуемую энергоёмкость удаётся не всегда, что приводит к перегрузке отдельных вагонов или необходимости увеличения числа аппаратов [1;3]. Дополнительной проблемой является деградация силовых и энергоемкостных характеристик в процессе длительной эксплуатации под действием циклических нагрузок, температурных воздействий и старения материалов, а также выраженная чувствительность параметров к температуре и скорости нагружения, особенно для гидравлических и полимерных систем [1; 4].

Особый интерес представляют аппараты с полимерными (эластомерными) элементами, которые благодаря упруговязкому поведению позволяют формировать относительно высокие значения энергоёмкости и значительную площадь силовой характеристики при ограниченных габаритах. Изменение формы эластомерных вставок, схемы их нагружения, а также конструкции аппарата позволяет повысить энергоёмкость и коэффициент полноты силовой характеристики, то есть приблизить силовую характеристику к требуемой «прямоугольной» форме [1; 5]. Однако такие пассивные решения не обеспечивают управляемости характеристик под различные условия нагружения и типы поездов: одна и та же конструкция демонстрирует различное поведение при маневровых ударах, аварийных соударениях и квазистационарных режимах тяги и торможения [1; 3]. Это создаёт предпосылки для поиска материалов и систем, в которых силовая характеристика могла бы целенаправленно варьироваться в процессе работы, в частности за счёт внешнего управляющего воздействия, что ведёт к рассмотрению магнитореологических эластомеров, способных изменять свои динамические свойства при приложении магнитного поля и, следовательно, обеспечивать адаптивное гашение энергии [4].

Магнитореологические эластомеры (МРЭ) относятся к классу магнитоактивных полимерных композитов, представляющих собой полимерную матрицу с внедрёнными магнитными микро- или наночастицами, способными реагировать на внешнее магнитное поле. В качестве матрицы, как правило, используют химически сшитые эластомерные системы на основе силиконовых каучуков, полиуретанов или других эластичных полимеров, обеспечивающих необходимую податливость и возможность значительных обратимых деформаций [6]. Магнитный наполнитель обычно представлен ферромагнитными или ферримагнитными частицами, вводимыми в виде микрочастиц или наночастиц с высокой магнитной восприимчивостью [4; 6].

Важной особенностью МРЭ является возможность целенаправленного формирования внутренней структуры композиции на стадии изготовления. При полимеризации в отсутствии магнитного поля частицы распределяются в матрице статистически равномерно, образуя изотропную структуру, для которой изменение механических и магнитомеханических свойств в поле носит, как правило, более умеренный характер [6]. Если же отверждение композита проводят в присутствии постоянного магнитного поля, частицы выстраиваются в цепочки, столбики или более сложные анизотропные структуры вдоль направления поля, что приводит к выраженной анизотропии механических свойств и существенно усиливает магнитореологический эффект [4; 6]. Подбор типа матрицы, размеров, формы и концентрации частиц, а также режима формирования структуры позволяет в широких пределах варьировать исходные модули упругости и степень управляемости материала [6].

Ключевое отличие МРЭ от обычных эластомерных материалов состоит в том, что их механические свойства становятся управляемыми внешним магнитным полем (рисунок 2).

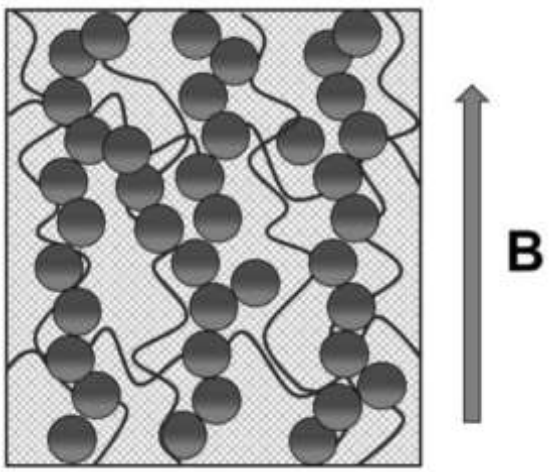


Рисунок 2 – Ориентация магнитных частиц магнитореологического эластомера под действием внешнего магнитного поля.

При приложении поля возрастает эффективный модуль упругости и жёсткость материала в направлении структурированных цепочек частиц, изменяется форма и площадь петли гистерезиса при циклическом нагружении,

что ведёт к регулированию демпфирующих свойств и энергоёмкости (рисунок 3) [4; 6].

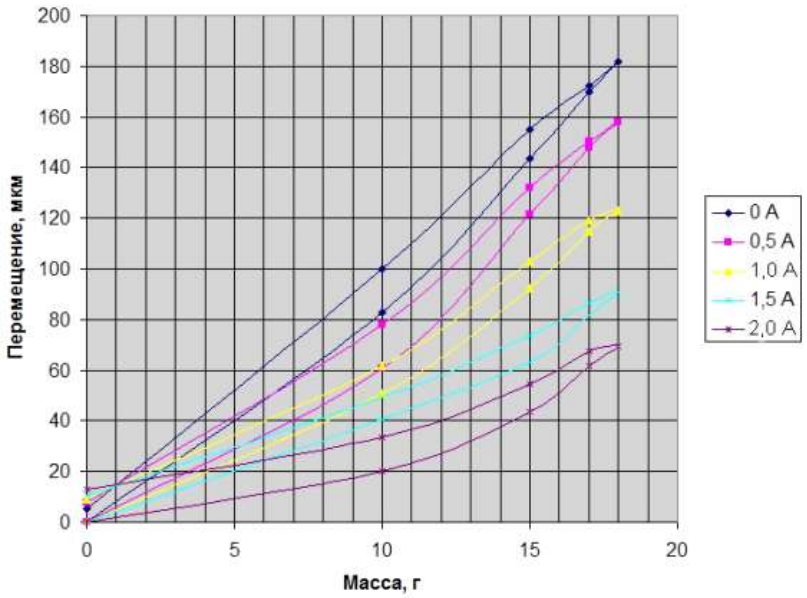


Рисунок 3 – Диаграмма зависимости перемещения от различных значений управляющей силы тока.

Экспериментальные исследования показывают, что изменение индукции магнитного поля позволяет смещать резонансные частоты образцов МРЭ в широком диапазоне, фактически перестраивая динамическую жёсткость и потери материала без изменения его геометрии и базового химического состава [4]. Благодаря этой способности МРЭ рассматриваются как перспективные управляемые элементы для систем виброизоляции и гашения ударных нагрузок, в том числе в виде адаптивных демпферов и поглощающих аппаратов, где силовая характеристика может изменяться в процессе работы в зависимости от текущих эксплуатационных условий [6; 7].

Магнитореологический эффект в эластомерах основан на перестройке пространственного расположения магнитных частиц в полимерной матрице под действием внешнего магнитного поля и изменении взаимодействий между ними. В отсутствие поля частицы распределены в матрице хаотически либо сохраняют слабоструктурированные агрегаты, и механические свойства материала определяются главным образом упруговязким откликом полимера и слабым магнитным взаимодействием наполняющих частиц [6]. При приложении магнитного поля ферромагнитные частицы поляризуются и начинают притягиваться вдоль линий магнитной индукции, формируя цепочки, столбики и более сложные кластеры, которые армируют матрицу в направлении поля и приводят к росту эффективного модуля упругости и жёсткости [4; 6]. Эта перестройка сопровождается изменением контактов между частицами, усилением магнитодипольных взаимодействий и, как следствие, изменением демпфирующих свойств материала, поскольку часть энергии деформации

расходуется на переориентацию и разрыв или восстановление магнитных связей в системе «частицы–матрица» [6].

Экспериментальные исследования динамических свойств МРЭ показывают, что под действием магнитного поля возможно существенное смещение резонансных частот образцов и изменение амплитудно-частотных характеристик [4; 7]. При увеличении напряжённости поля резонансная частота системы с МРЭ-вставкой смещается в область более высоких частот, что соответствует росту динамической жёсткости материала, при этом амплитуды колебаний на резонансе могут как снижаться, так и изменяться более сложно в зависимости от сочетания упругих и вязких составляющих отклика [4]. Наблюдаемое изменение частотных характеристик позволяет целенаправленно управлять передачей вибраций, уводя рабочие резонансы системы из диапазонов воздействующих колебаний и тем самым повышая эффективность виброизоляции и гашения энергии [4; 7].

Важнейшей особенностью МРЭ с точки зрения демпфирования является наличие выраженных гистерезисных потерь при циклическом нагружении и возможность управлять уровнем рассеиваемой за цикл энергии посредством изменения магнитного поля. Петля гистерезиса на диаграмме «напряжение–деформация» расширяется при увеличении индукции, что свидетельствует о росте доли энергии, переходящей в тепло за счёт внутренних трений в матрице и переупорядочения магнитных частиц [4; 6]. В ряде работ показано, что варьирование напряжённости поля в процессе колебания позволяет фактически реализовать полуактивный или активный режим демпфирования, при котором коэффициент потерь и, соответственно, энергия, рассеиваемая за цикл, регулируются в реальном времени [6; 7]. Такое сочетание управляемой жёсткости и регулируемого демпфирования делает МРЭ перспективной основой для создания полуактивных и активных демпфирующих элементов, в которых силовая характеристика поглощающего устройства может адаптивно перестраиваться под текущие условия нагружения, что принципиально важно для задач виброизоляции высокоточного оборудования и для гашения ударных нагрузок в транспортных системах [7].

Конструкции виброизоляторов и демпферов на основе магнитореологического эластомера сегодня в первую очередь разрабатываются для задач виброизоляции высокоточного и нанотехнологического оборудования, а также для систем активной и полуактивной виброзащиты. В ряде работ реализованы демпферы, в которых МРЭ-элемент включён в упругодемпфирующую цепь виброизолятора и работает в режиме сдвига или сжатия; изменение напряжённости магнитного поля позволяет перестраивать его динамическую жёсткость и коэффициент потерь, тем самым управляя передаточной функцией системы «основание – изолируемый объект» [4; 7]. Экспериментальные исследования таких демпферов для виброизоляции нанотехнологического оборудования показывают, что за счёт регулирования поля удаётся изменять резонансные

частоты и уровень передаваемых колебаний, снижая амплитуды вибраций в рабочем диапазоне частот и варьируя долю энергии, рассеиваемой в МРЭ-слое [7]. Аналогичные подходы применяются в элементах мягкой робототехники и интеллектуальных конструкциях, где МРЭ-вставки играют роль управляемых упругодемпфирующих звеньев, позволяющих адаптировать жёсткость и демпфирование под текущий режим работы системы [6].

Типичные условия работы МРЭ-демпферов для виброизоляции высокоточного оборудования характеризуются сравнительно малыми амплитудами перемещений и скоростей деформации при широком диапазоне частот, при этом ключевым параметром является управление передаточной функцией и подавление резонансных пиков при ограниченных усилиях [7]. В то время как поглощающие аппараты автосцепки работают в существенно иных условиях: они должны воспринимать ударные и квазистатические продольные нагрузки с высокими уровнями усилий, значительными ходами и жёстко нормированной энергоёмкостью, обеспечивая при этом устойчивость характеристик в условиях многократных циклов нагружения, вариаций температуры и агрессивной среды [1; 2]. Несмотря на различие в масштабах нагрузок и кинематике работы, общим остаётся требование к формированию заданной силовой характеристики и к возможности управлять уровнем рассеиваемой энергии, что делает подходы, отработанные на виброизоляторах и активных системах виброзащиты, концептуально переносимыми на задачи продольного демпфирования подвижного состава [6; 7].

С учётом этого МРЭ могут рассматриваться как управляемые элементы в составе поглощающих аппаратов автосцепки, способные формировать желаемую силовую характеристику в зависимости от режима работы состава. Наличие магнитоуправляемой жёсткости и демпфирования открывает возможность адаптивной перестройки характеристик: например, повышение жёсткости и энергоёмкости при маневровых ударах и аварийных соударениях и, напротив, снижение жёсткости и уровня сил при тяговых и тормозных режимах, где важно ограничить усталостные нагрузки на автосцепку [4; 6]. По сравнению с традиционными пассивными полимерными элементами переход к МРЭ даёт потенциал повышения энергоёмкости и коэффициента полноты силовой характеристики за счёт оптимизации структуры материала и управления магнитным полем, а также потенциального снижения пиковых продольных усилий за счёт активной или полуактивной регулировки демпфирующих свойств [6; 7]. При этом требуется адаптация существующих инженерных решений под существенно более высокие нагрузки и ходы, характерные для поглощающих аппаратов автосцепки, а также разработка специализированных систем управления полем, что и определяет актуальные направления дальнейших исследований [1; 7].

Список литературы:

1. Беспалько, С. В. Исследование соударений вагонов, оборудованных эластомерными поглощающими аппаратами, с использованием компьютерного моделирования / С. В. Беспалько, С. С. Андриянов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2004. – № 5. – С. 7-8. – EDN VXMSFZ.

2. ГОСТ 32913-2014. Поглощающие аппараты сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Технические условия и правила приемки. Введ. 2015-06-01. М.: Стандартинформ, 2015. 12 с.

3. Беляев В.И. Влияние несущей характеристики поглощающих аппаратов на продольную динамику электропоездов и высокочастотную усталость автосцепки // Вестник ВНИИЖТ. 2023. Т. 82, № 2. С. 109–116. DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-2-109-116.

4. Коровкин Ю.В., Минаев А.Я., Степанов Г.В. Экспериментальные исследования динамических свойств магнитореологических эластомеров // Труды VII Международной научно-технической конференции. 2015. С. 789–792.

5. Кравцов С.А., Болдырев А.П., Лозбинев Ф.Ю. Расчетно-экспериментальная оценка характеристик полимерных элементов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 7–16. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-7-16

6. Наджарян Т.А., Костров С.А., Крамаренко Е.Ю. Магнитоактивные полимерные композиты: достижения и перспективы развития // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2024. № 6. Ст. 2460503. DOI: 10.55959/MSU0579-9392.79.2460503.

7. Михайлов В.П., Зобов И.К., Селиваненко А.С. Демпфер на основе магнитореологического эластомера для активной виброизоляции нанотехнологического оборудования // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 6. [Электронный ресурс]. URL: http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/813.html (дата обращения: 26.04.2026)

УДК 678.026.32

Шевляков Ф. Б., Айгазиева К. Р.
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКТОРА ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ИЗОПРЕНА

Аннотация: в статье рассматриваются проблемы неравномерного распределения каталитического комплекса в объеме реакционной массы и отложение частиц полимера на стенках предреактора диффузор-конфузорной конструкции при растворной полимеризации изопрена на катализаторах Циглера-Натта, которые приводят к ухудшению качества получаемого полимера за счет расширения молекулярно-массового распределения (ММР) и увеличенному расходу каталитического комплекса. Для обеспечения равномерного диспергирования каталитического комплекса и уменьшению отложений на стенках предложена оптимизация модели предреактора диффузор-конфузорной конструкции при помощи компьютерного моделирования в программе Simcenter Star-CCM+. В ходе исследования было рассмотрено 5 различных геометрий предреактора диффузор-конфузорной конструкции и получена оптимальная модель. Полученный предреактор позволяет сократить отложение на стенках предреактора, а также обеспечить высокую степень диспергирование катализатора, что приводит к увеличению удельной поверхности катализатора и уменьшению его расхода.

Ключевые слова: полимеризация изопрена, предреактор, оптимизация, молекулярно-массовое распределение, моделирование

1. Введение

Синтетический изопреновый каучук сегодня является одним из стратегически важных материалов. Он применяется во многих отраслях: шинная промышленность, изготовление резинотехнических изделий, медицина, строительство. С каждым годом его роль растет и это связано, во-первых, с развитием автомобильной промышленности, а во-вторых с отсутствием натурального каучука в стране, аналогом которого он является [1, 2].

Производство СКИ в России в большей степени сосредоточено на четырех предприятиях: ПАО «Воронежсинтезкаучук», ОАО «Синтез-Каучук», ПАО «Нижнекамскнефтехим» и ООО «СИБУР Тольятти». По данным Росстата, за 2021 год в России было выпущено наибольшее количество каучука за 30 лет – 1 млн. 486 тыс. т. На сегодняшний день на российский рынок изопренового каучука влияет уменьшение его экспорта, из-за чего объемы производства сократились, но материал все также является востребованным [3, 4, 5].

Существует большое количество технологий для производства синтетического каучука: блочная, эмульсионная, суспензионная полимеризация, полимеризация в растворе. Наиболее распространенно технологией производства СКИ является стереоспецифическая растворная

полимеризация изопрена на титановых катализаторах Циглера-Натта. В качестве растворителя как правило используется изопентан, процесс отличается своими мягкими условиями и лучшей управляемостью по сравнению с другими способами. Полимеризация осуществляется в каскаде реакторов смешения с охлаждающей рубашкой, температура процесса постепенно растет от 30 до 60 °С для поддержания скорости реакции, давление поддерживают на уровне 0,2-0,5 МПа [6, 7, 8].

В общем случае установка полимеризации изопрена состоит из следующих блоков:

1. Блок приготовления катализатора;
2. Блок подготовки изопрен-изопентановой шихты;
3. Блок полимеризации изопрена;
4. Блок дезактивации катализатора и промывки полимеризата;
5. Блок выделения каучука и его подготовка к транспортированию [9].

Нужно отметить, что для производства различных марок СКИ используются разные каталитические системы: на основе переходных металлов, литиевые, неодимовые. В данной работе рассматривается процесс полимеризации изопрена на каталитической системе $TiCl_4$–ТИБА триизобутилалюминий) ($Al(i\text{-}C_4H_9)_3$), модифицированная различными добавками. Такой катализатор обладает высокой стереореглярностью, обеспечивает образование 1,4-цис-звеньев на уровне 92-98% На таких системах поучают каучук марок СКИ-3, СКИ-3С, СКИ-3Д [10].

Хоть данная технология является достаточно распространенной и отработанной, в промышленности существуют проблемы: высокая экзотермичностью процесса, быстрый рост вязкости, неравномерное распределением каталитического комплекса в реакционном объеме, локальные перегревы, а также, как следствие, расширением молекулярно-массовым распределением (ММР). ММР является ключевым параметром, который определяет эксплуатационные и реологические свойства СКИ, при узком ММР каучук имеет боле высокую прочность, большее сопротивление раздиру [11, 12].

Реактора смешения, применяемые промышленности обеспечивают отвод тепла и перемешивание реакционной массы, но, из-за того, что процесс полимеризации изопрена протекает с высокой скоростью, в зоне реакции происходит неравномерное распределение концентрации компонентов и глубины протекания реакции [11].

Для решения проблемы по неравномерному распределению активных центров каталитического комплекса предлагалось целенаправленное гидродинамическое воздействие на поток, подаваемый в реактор-полимеризатор. Суть метода заключается в установке перед батареями полимеризаторов предреактора для смешения исходной изопреновой шихты и каталитического комплекса. Предреактор представляет собой участок

трубопровода, имеющий диффузор-конфузорную конструкцию (рисунок 1) [13].

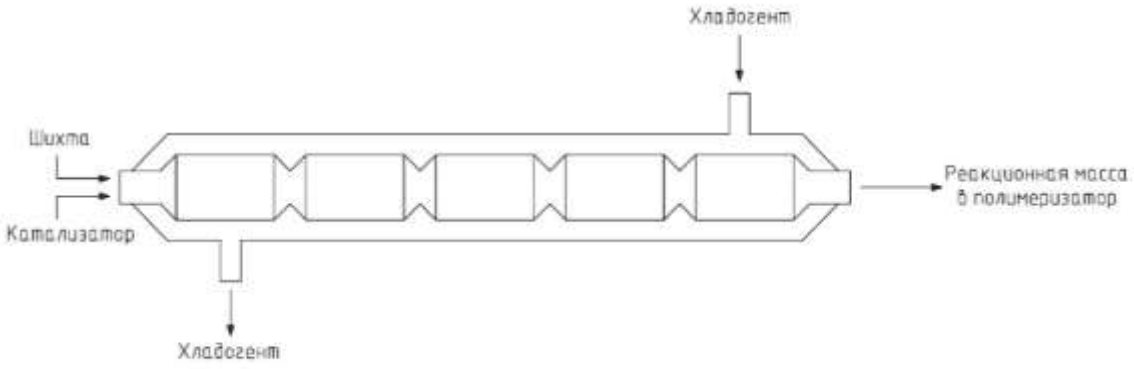


Рисунок 1. Предреактор диффузор-конфузорной конструкции.

За счет своей формы он обеспечивает турбулизацию потока, в результате чего агломераты каталитического комплекса диспергируются в объеме реакционной массы – увеличивается удельная поверхность катализатора. Такая конструкция позволяет снизить расход катализатора и обеспечить равномерное его распределение в объеме реакционной массы.

Подобный предреактор был использован на предприятии ОАО «Синтез-Каучук» в цехе И-5П производства изопреновых каучуков. Он был установлен на стадии приготовления катализатора, а именно на линии циркуляции каталитического комплекса: перед отбором на полимеризацию частицы катализатора циркулировали через смеситель и подвергались гидродинамическому воздействию, в результате чего происходит диспергирование катализатора. Однако процесс полимеризации изопрена относится к быстрым реакциям: на некоторых активных центрах запускался процесс полимеризации, в результате такие частицы могли оседать на стенках предреактора, из-за чего требовалась частая очистка аппарата, что приводило к дополнительным затратам на обслуживание установки [11, 14].

Целью данной работы является разработка оптимальной конструкции предреактора диффузор-конфузорной конструкции для обеспечения диспергирования каталитического комплекса и минимизации отложений на стенках аппарата. Для достижения поставленной цели использован программный комплекс Simcenter STAR-CCM+, который позволит подобрать нужную конструкцию предреактора с помощью расчета гидродинамики потока.

2. Материалы и методы исследования

Основа каждого исследования – это разработка методологии. Так как процесс полимеризации изопрена является сложным и требует большие ресурсные и энергетические затраты даже в лабораторных условиях, то

лучшим способом для решения поставленной проблемы является разработка модели аппарата в программном обеспечение, которое позволит тестировать теоретические гипотезы, легко менять параметры процесса и видеть, как они влияют на него, устанавливать причинно-следственные связи. Компьютерное моделирование позволит учитывать различные факторы, влияющие на процесс, такие как скорость, вязкость, температура, концентрации дисперсной фазы, а также провести параметрическую оптимизацию геометрии без использования реальных прототипов. Такой метод позволит сократить сроки исследования и минимизировать капитальные затраты [15, 16].

Для разработки модели предреактора был использован программный комплекс для CFD-моделирования – Simcenter STAR-CCM+. Данная программа – это оптимальная среда для проведения численного моделирования, в ней можно рассчитать различные физические, химические процессы, проводить как стационарные, так и динамические расчеты. Принцип расчета основан на методе конечных объемов – программа дискретизирует геометрию модели при помощи сетки и решает уравнения с учетом физических моделей (например, турбулентности, кавитации и др.). Главная идея этого метода – это то, что любая непрерывная величина может быть аппроксимирована дискретной моделью, которая состоит из отдельных элементов, что обеспечивает выполнение законов сохранения в каждом элементе расчетной области [17, 18]

К основным достоинствам программы можно отнести широкий спектр физических моделей, высокая степень автоматизации программы и построения сеток, возможность расчета сложных конструкций аппаратов, а также обеспечивает более тонкий контроль над физикой фазовых переходов и турбулентности. Из-за этих достоинств данная программа будет оптимальной для решения поставленной задачи по разработки оптимальной модели предреактора [16].

Основными этапами в разработке и расчете модели будут:

1. Построение геометрии предреактора в программе Компас 3D и импорт модели в программу Star CCM+;
2. Генерация расчетной сетки;
3. Настройка физических моделей:
4. Задание начальных и граничных условий процесса;
5. Расчет и анализ полученных результатов;
6. Подбор оптимальной конструкции предреактора на основе полученных результатов [19].

3. Исследовательская часть

В ходе исследования были рассмотрены несколько конструкций предреактора:

1. Предреактора с постоянным сечением трубопровода;
2. Предреактор диффузор-конфузорной конструкции, используемый ранее на практике;

3. Предреактор диффузор конфузорной конструкции с укороченными секциями и меньшим количеством диффузорых зон.

Для моделирования предреактора использовались одинаковые граничные условия (таблица 1):

Таблица 1. Граничные условия для моделирования предреактора

Параметр	**Значение**
Основные материалы	Изопрен-изопентановая шихта, каталитический комплекс
Скорость потока, м/с	0,5
Вязкость изопрен-изопентановая шихты, Па*с	0,00027
Плотность изопрен-изопентановая шихты, кг/м^3	630
Концентрация изопрена, моль/м^3	1516
Молярная масса изопрена, кг/моль	0,068
Константа роста цепи, м^3/(моль·с)	100
Плотность полимера, кг/м^3	920
Начальный размер активных центров, мкм	3
Плотность активных центров, кг/м^3	2000
Концентрация активных центров, моль/м^3	2

Известно, что при гетерогенной полимеризации на каталитических системах Циглера-Натта активные центры находятся на поверхности твердых частиц катализатора. При взаимодействии изопрена с катализатором на поверхности частицы начинается рост полимерных цепей, в результате чего образуется полимерная оболочка – происходит рост этой частицы.

Сначала концентрация изопрена на поверхности активных центров одинаковая и поэтому, можно сказать, что рост частицы полимера происходит постепенно и равномерно.

Для описания этого процесса была задана группа частиц на поверхности которых запускается процесс полимеризации. Для описания их роста было выведено уравнение:

1. Для сферической частицы радиуса R:

$m(t) = \frac{4}{3}\pi R(t)^3 \cdot \rho_{pol}$ (1)

где *m(t)* – масса полимера в одной частице в момент времени t;

R(t) – текущий радиус частицы;

ρ_{pol} – плотность полимера.

Продифференцируем это уравнение:

$\frac{d}{dt}\left(\frac{4}{3}\pi R(t)^3 \rho_{pol}\right) = 4\pi R^2 \rho_{pol} \frac{dR}{dt}$ (2)

2. Скорость накопления массы:

$\frac{dm}{dt} = \frac{4}{3}\pi R(t)^3 \cdot r_v(t)$ (3)

где $r_v(t)$ – скорость роста цепи

3. Приравниваем уравнения 2 и 3

$4\pi R^2 \rho_{pol} \frac{dR}{dt} = \frac{4}{3}\pi R^3 r_v$ (4)

$\frac{dR}{dt} = \frac{r_v}{3\rho_{pol}} R(t)$ (5)

4. Скорость роста цепи рассчитывается по формуле

$r_v = M_{iso} \cdot k_p \cdot [M] \cdot [C^*]$ (6)

где M_{iso} – молярная масса изопрена

k_p – константа скорости роста цепи

[M] – локальная концентрация

[C]* – концентрация активных центров

5. Подставим формулу 6 в формулу 5

$\frac{dR}{dt} = \frac{M_{iso} \cdot k_p \cdot [M(r,t)] \cdot [C^*(r,t)]}{3\rho_{pol}} R(t)$ (7)

Данные для уравнения 7 представлены также в таблице 1.

Геометрия предреактора с постоянным сечением представлен на рисунке 2 и в таблице 2:

Таблица 2. Параметры геометрии модели с постоянным сечением

Параметр	**Значение**
Диаметр трубопровода, мм	159
Толщина стенки, мм	2
Длина трубопровода, мм	1500

Рисунок 2. Геометрия предреактора с постоянным сечением.

Расчет модели показал следующий результат:

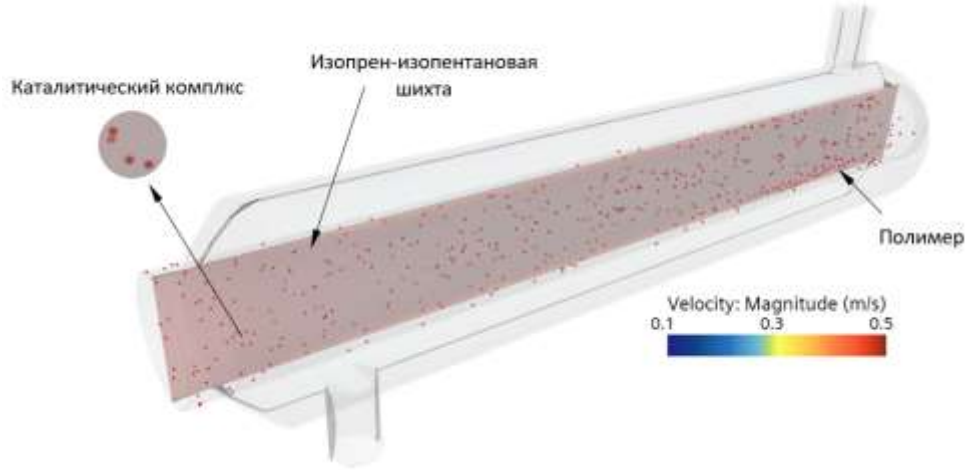


Рисунок 3. Распределение скорости потока и каталитического комплекса по длине предреактора.

По рисунку 3 видно, что скорость потока по всей длине аппарата одинаковая из-за чего происходит плохое перемешивание и диспергирование каталитического комплекса: частицы крупные и неравномерно распределяются в объеме реакционной массы. К тому же, из-за высокой скорости процесса полимеризации, на активных центрах запускается процесс роста цепи и в конце аппарата происходит отложение полимера на стенках, что со временем приводит к уменьшению диаметра для прохода реакционной массы.

На следующем этапе проводилось моделирование предреактора диффузор-конфузорной конструкции. В патентах [13, 14] были описаны геометрические размеры такого предреактора, который был использован на практике на предприятии ОАО «Синтез-Каучук»: наименьший диаметр соотносится с диаметром цилиндрической части как 1/2, а соотношение наименьшего диаметра к длине цилиндрической части составляет 1/3, число секций в предреакторе равно 5. На основе этих данных была построена геометрия этого аппарата.

Конструкция представлена на рисунке 4 и в таблице 3:

Таблица 3. Основные размера предреактора диффузор-конфузорной конструкции

Параметр	**Значение**
Диаметр входного и выходного патрубка, мм	80
Длина входного патрубка,	100
Угол конусности, ^{o}	54
Диаметр диффузорной части, мм	160
Длина диффузорной части, мм	240
Количество секций, шт.	5

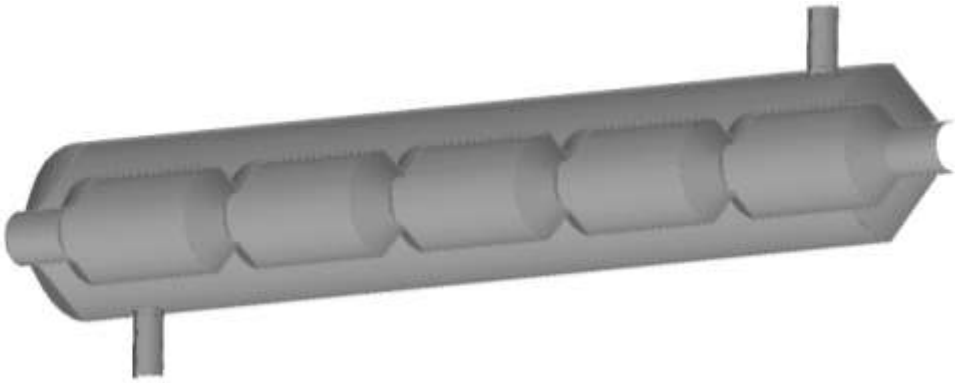


Рисунок 4. Геометрия предреактора диффузор конфузорной конструкции.

В результате проведенных расчетов были получены следующие данные:

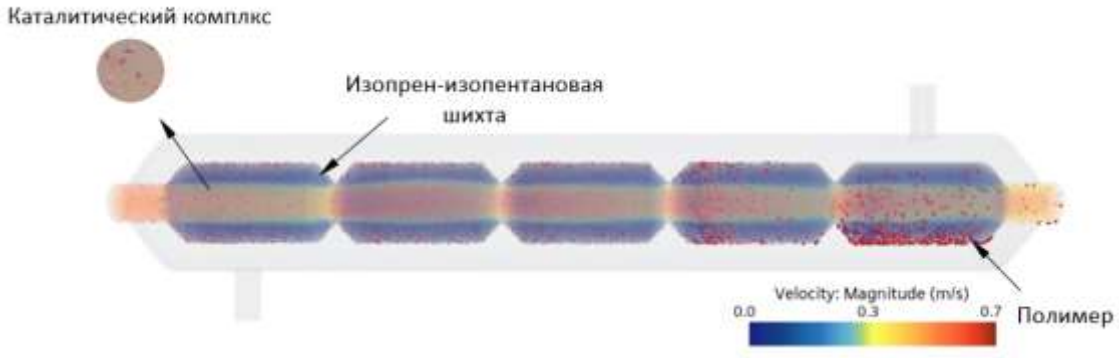


Рисунок 5. Распределение скорости и дисперсной фазы по длине предреактора.

По рисунку 5 видно, что скорость потока в области сужения высокая и достигает практически 0,7 м/с, однако в диффузорных зонах происходит резкое падение скорости потока около стенок [20].

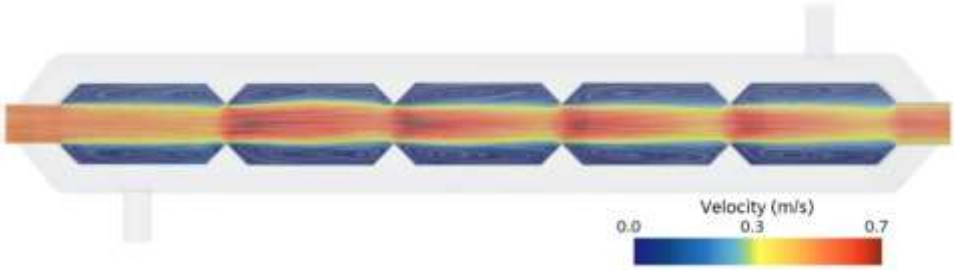


Рисунок 6. Распределение полей скорости по длине предреактора.

По рисунку 6 можно увидеть, что за счет диффузоров и конфузоров происходит перемешивание потока, образуются вихри. За счет этого каталитический комплекс диспергируется и равномерно распределяется по объему предреактора. В результате диспергирования увеличивается количество активных центров и растет удельная поверхность катализатора. Однако могут образовываться застойные зоны в областях отрыва потока от стенок аппарата, в которых со временем может происходить отложение геля.

Также на рисунке 5 в последних секциях предреактора заметны значительные отложения каталитического комплекса на стенках аппарата из-

за начала процесса полимеризации на активных центрах. Полимер начинает налипать на стенках, приводит к закупориванию аппарата, что приведет к ухудшению перемешивания и частым остановам процесса для очистки [21].

По анализу потоков предреактора диффузор-конфузорной конструкции было сделано предположение: для равномерно распределения скорости потока необходимо уменьшить угол перехода диффузор-конффузорных зон, а также сократить диффузорную секцию, а также для уменьшения отложений на стенках аппарата необходимо уменьшить количество секций.

Таким образом была построена следующая геометрия предреактора:

Таблица 4. Геометрические размеры оптимальной конструкции предреактора

Параметр	**Значение**
Диаметр входного и выходного патрубка, мм	80
Длина входного патрубка,	100
Угол консуности, ^{o}	45
Диаметр диффузорной части, мм	160
Длина диффузорной части, мм	180
Количество секций, шт.	4

Рисунок 7. Оптимальная конструкция предреактора диффузор-конфузорной конструкции

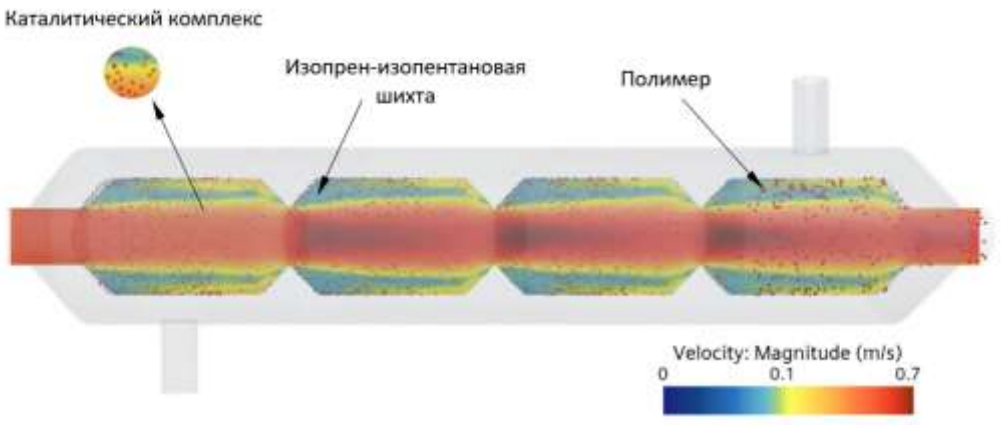


Рисунок 8. Геометрия предреактора оптимальной диффузор-конфузорной конструкции

По результатам расчета, представленном на рисунке 8, можно увидеть, что поток более равномерно распределен по диффузорной зоне, что обеспечивает диспергирование каталитического комплекса и уменьшение количества застойных зон, на которых возможно образование геля. Также видно, что в последней секции отложение полимера незначительно, что позволяет увеличить межочистной период [22, 23].

Уменьшение угла раскрытия диффузора и уменьшение длины диффузорной секции приводит к более плавному переходу потока от диффузорной в конфузорную зону, при этом сохраняется турбулентность и вихреобразование, что ведет к диспергированию каталитического комплекса, и увеличению его удельной поверхности. В результате активные центры равномерно распределены по объему реакционной зоны, реакция будет протекать равномерно по всему объему и за счет этого образующийся полимер будет с узким ММР, что делает качество каучука выше. К тому же повышение удельной поверхности позволяет сократить расход катализатора практически в 1,5 раза, что дает значительный экономический эффект [11, 24].

Заключение

В ходе проведенного исследования с помощью программного комплекса Simcenter Star-CCM+ была подобрана оптимальная конструкция предреактора, в котором происходит смешения каталитического комплекса и изопрен-изопентановой шихты. Полученная диффузор-конфузорная конструкция обеспечивает равномерное распределение скорости потока по длине предреактора, хорошее диспергирование активных центров в реакционной массе, а также минимизирует отложения полимера на стенках аппарата. Полученная конструкция позволяет получить полимер с узким ММР и сократить расход каталитического комплекса, к тому же, из-за минимизации отложений, количество остановов на очистку уменьшается, то есть увеличивается межочистной период, что было одной из проблем диффузор-конфузорного предреактора используемого на предприятии ОАО «Синтез-Каучук».

Список литературы:

1. Литвин, О.Б. Основы технологии синтеза каучуков / О.Б. Литвин. – Москва: Химия, 1972. – 328 с. – Текст: непосредственный.

2. Клепиков, Д.Н. Развитие отечественной шинной промышленности / Д.Н. Клепиков, З.В. Вдовенко // Успехи в химии и химической технологии. – 2016. – № 5. – С. 37–39. – Текст: непосредственный.

3. Аксёнов, В.И. Производство синтетического каучука в России: анализ итогов за 2022 г. перспективы развития / В.И. Аксёнов, И.Ш. Насыров // Промышленное производство и использование эластомеров. – 2023. – № 1. – С. 3–14. – Текст: непосредственный.

4. Аксёнов, В.И. Анализ производства синтетического каучука российскими компаниями в 2021 г.: итоги, события и возможные перспективы развития / В.И. Аксёнов //

Промышленное производство и использование эластомеров. – 2022. – № 1. – С. 3–15. – Текст: непосредственный.

5. Федеральная служба государственной статистики. Производство продукции в натуральном выражении [Электронный ресурс]. – URL: https://rosstat.gov.ru/ (дата обращения: 05.03.2025). – Текст: электронный.

6. Осовская, И.И. Технология полимеров. Методы получения высокомолекулярных соединений: учебное пособие / И.И. Осовская, А.Е. Баранова. – Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. – 74 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-91646-342-2. – Текст: непосредственный.

7. Музафаров, А.М. Введение в химию высокомолекулярных соединений. Учебное пособие для студентов по специальности «Композиционные наноматериалы» / А.М. Музафаров, А.А. Кузнецов, М.Ю. Заремский, А.Н. Зеленецкий. – М.: 2010. – 47 с. – Текст: непосредственный.

8. Долинская, Р.М. Технология и оборудование синтеза и переработки полимеров. Курсовое проектирование: учебно-методическое пособие для студентов химико-технологических специальностей / Р.М. Долинская. – Минск: БГТУ, 2021. – 107 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-985-530-912-4. – Текст: непосредственный.

9. Аверко-Антонович, Л. А. Химия и технология синтетического каучука / Л. А. Аверко-Антонович, Ю. О. Аверко-Антонович, И. М. Давлетбаева, П. А. Кирпичников. – Москва: КолосС, 2008. – 357 с. – Текст: непосредственный.

10. Чирков, Н. М. Полимеризация на комплексных металлоорганических катализаторах / Н. М. Чирков, П. Е. Матковский, Ф. С. Дьячковский. – Москва: Химия, 1976. – 416 с. – Текст: непосредственный.

11. Берлин, Ал. Ал. Новые унифицированные энерго- и ресурсосберегающие высокопроизводительные технологии повышения экологической чистоты на основе трубчатых турбулентных реакторов / Ал. Ал. Берлин, К. С. Минскер, К. М. Дюмаев. – Москва: НИИТЭХИМ, 1996. – 188 с. – Текст: непосредственный.

12. Мингалеев, В.З. Дисперсность титанового катализатора и кинетические параметры стереоспецифической полимеризации бутадиена / В. З. Мингалеев, В. П. Захаров, П. В. Тимофеев, П. А. Тайбулатов, Е. А. Глухов // Вестник Башкирского университета. – 2009. – Т. 14, № 3. – С. 112–119. – Текст : непосредственный.

13. Патент RU 2059656 C1. Способ получения цис-1,4-полиизопрена/ Ю.А. Прочухан, К.С. Минскер, Р.З. Биглова, Р.Х. Рахимов, Ю.П. Баженов, С.К. Минскер, И.Ш. Насыров, П.И. Кутузов, А.А. Берлин, В.И. Вижняев; заявители: Башкирский государственный университет им. 40-летия Октября, Стерлитамакский завод синтетического каучука им. 50-летия Башкирской АССР; патентообладатели: АО «Каучук», Башкирский государственный университет им. 40-летия Октября. – № 5063227/04; заявл. 29.05.92; опубл. 10.05.96, Бюл. № 13. – Текст: непосредственный.

14. Патент RU 2059657 C1. Способ получения цис-1,4-полиизопрена / К. С. Минскер, Ю. А. Прочухан, Р. З. Биглова, Р. Х. Рахимов, Ю. П. Баженов, С. К. Минскер, И. Ш. Насыров, П.И. Кутузов, С.В. Колесов, В.И. Вихняев; заявители: Башкирский государственный университет им. 40-летия Октября, Стерлитамакский завод синтетического каучука им. 50-летия Башкирской АССР; патентообладатели: АО «Каучук», Башкирский государственный университет им. 40-летия Октября. – № 5064177/04; заявл. 10.05.96; опубл. 10.05.96, Бюл. № 13. – Текст: непосредственный.

15. Новиков, А.М. Методология научного исследования / А. М. Новиков, Д.А. Новиков. – М.: Либроком, 2010. – 280 с. – Текст: непосредственный.

16. Колесникова, Т. Применение мультифизического моделирования при проектировании печатных плат электронных устройств / Т. Колесникова // Современная электроника. – 2020. – № 8. – С. 48–57. – Текст: непосредственный.

17. Кочетов, Н.А. Моделирование с помощью программного комплекса STAR CCM+ теплового состояния и естественной конвекции в металлическом слое расплава при тяжелых авариях в реакторах типа ВВЭР / Н.А. Кочетов, В. Д. Локтионов, А. С. Сидоров // Теплоэнергетика. – 2015. – № 9. – С. 52. – Текст: непосредственный.

18. Versteeg, H.K. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method / H.K. Versteeg, W. Malalasekera. – 2nd ed. – Harlow: Pearson, 2007. – 503 p. – Текст: непосредственный.

19. Урманчеев, С.Ф. Оптимизация числа диффузор-конфузорных секций в турбулентном реакторе применительно к синтезу полимеров / С.Ф. Урманчеев, В.З. Мингалеев, Ю.В. Морозов, И.Ш. Насыров, В.П. Захаров, Ю.Б. Монаков // Химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55, № 7. – С. 90–92. – Текст: непосредственный.

21. Данилов, Ю.М. Оптимизация формы проточной части трубчатых турбулентных реакторов / Ю.М. Данилов, Г.С. Дьяконов, А.Г. Мухаметзянова, А.Н. Бергман, И.М. Ильина // Процессы и аппараты химической технологии. – 2012. – С. 116–124. – Текст: непосредственный.

22. Волков, К.Н. Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов. – Москва: Физматлит, 2012. – 465 с. – ISBN 978-5-9221-1438-7. – Текст: непосредственный.

23. Данилов, Ю.М. Решение трехмерных задач о течении вязких несжимаемых жидкостей в каналах прямоугольной формы / Ю.М. Данилов, И.М. Ильина, И.П. Ситдикова, А.Н. Бергман // Естественные и технические науки. – 2003. – № 3. – С. 88–97. – Текст: непосредственный.

24. Ильина, И. М. Численное моделирование турбулентных течений / И. М. Ильина, Е. А. Петровичева // Материалы научной сессии. – М.: Наука, 1990. – 216 с. – Текст: непосредственный.

УДК 004.89:338.48

Ларионов И. И.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

КОМПЛЕКСНОЕ ОТРАСЛЕВОЕ ИТ-РЕШЕНИЕ ДЛЯ СФЕРЫ СОБЫТИЙНОГО ТУРИЗМА

Аннотация: статья посвящена исследованию ИТ-решений в сфере событийного туризма, а также разработке полноценного AI-агента для популяризации и повышения туристического потока в рамках внутреннего туризма. На основе открытых данных были рассмотрены оптимальные LLM и иные ИТ-решения которые зарекомендовали себя на зарубежных рынках, запросы и потребности потребителей и статистика, помогающая объективно оценить предлагаемое решение. **Цель:** целью данного исследования является разработка универсального ИИ «турагента» в рамках сферы событийного туризма РФ
Метод: в рамках исследования задействовался метод анализа, моделирования и эксперимента. **Результат:** Результатом настоящего исследования является создание первичной версии ИИ «Турагента» и разбор его ключевых преимуществ для решения проблем в рамках событийного туризма. **Выводы:** ключевыми выводами в рамках проведенного исследования является наличие проблемы низкой информационной поддержки и осведомленности туристов в рамках событийного туризма России. Данная проблема ослабляет потенциальный рост данного сегмента туризма и уступает иным проектам. Разработанное ИТ-решение поспособствует решению данной проблемы.
Ключевые слова: ИТ-решение, событийный туризм, AI-агент, большие языковые модели (LLM), внутренний туризм, информационная поддержка, туристический поток, искусственный интеллект.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА

Использование искусственного интеллекта за последние годы стало не просто нормой, а необходимостью. Современные нейросети позволяют выполнять широкий круг задач: от копирайтинга до анализа большой базы данных. Предприятия все чаще пытаются интегрировать AI-решения для достижения максимальной продуктивности работы, создания уникальных решений и совершенствования сервиса.

Туристическая отрасль не является исключением. Многие российские операторы начали интегрировать искусственный интеллект для разработки туристических маршрутов, анализа цифрового следа клиента и автоматизации рутинных процессов.

Однако, большинство данных решений используются исключительно во внутренней структуре компании, как правило, оптимизируя лишь собственные бизнес-процессы компании. Они не создают для конечного потребителя уникальную ценность и напрямую не влияют на принятие им решения.

Гипотеза настоящего проекта заключается в том, что интеграция искусственного интеллекта, а именно AI-гида, в рамках событийного туризма

России позволит популяризировать данную отрасль, увеличив туристический поток на 10–15% в рамках поездок, связанных с событийным туризмом.

Мировая практика показывает, что внедрение нейросетей, в частности чат-ботов, помогают увеличить количество точек касаний с клиентов, повышения лояльность потребителя и популярность своего туристического продукта.

В США пионером внедрения ИИ в бизнес-процессы стал корпоративный сегмент. 90% компаний в сфере корпоративного туризма уже используют ИИ в управлении командировками. Это говорит о зрелости B2B-сегмента, где автоматизация бизнес-процессов, мониторинга тревел-политик и анализа отклонений от бюджета стали стандартом. При этом 52% оценили результаты внедрения как «превзошел ожидания». [14]

Стоит поговорить о конкретных примерах. Виртуальные туристические помощники и чат-боты становятся неотъемлемой частью индустрии туризма, выполняя такие задачи, как бронирование отелей и ответы на вопросы. Поскольку предприятиям сложно быть доступными в Интернете 24/7 для поддержки клиентов, эти инструменты искусственного интеллекта предоставляют мгновенные автоматизированные ответы, сокращая время ответа клиентам. Часто агенты по путешествиям с искусственным интеллектом могут улучшить впечатления от путешествия даже эффективнее, чем помощь человека. [15]

Виртуальный помощник mezi был разработан как универсальный инструмент для автоматизации рутины конечного потребителя. Он применяется в том числе гостиничной среде и туризме, помогая забронировать номер в отеле, составить интересный маршрут по достопримечательностям и даже купить билеты по самой выгодной цене.

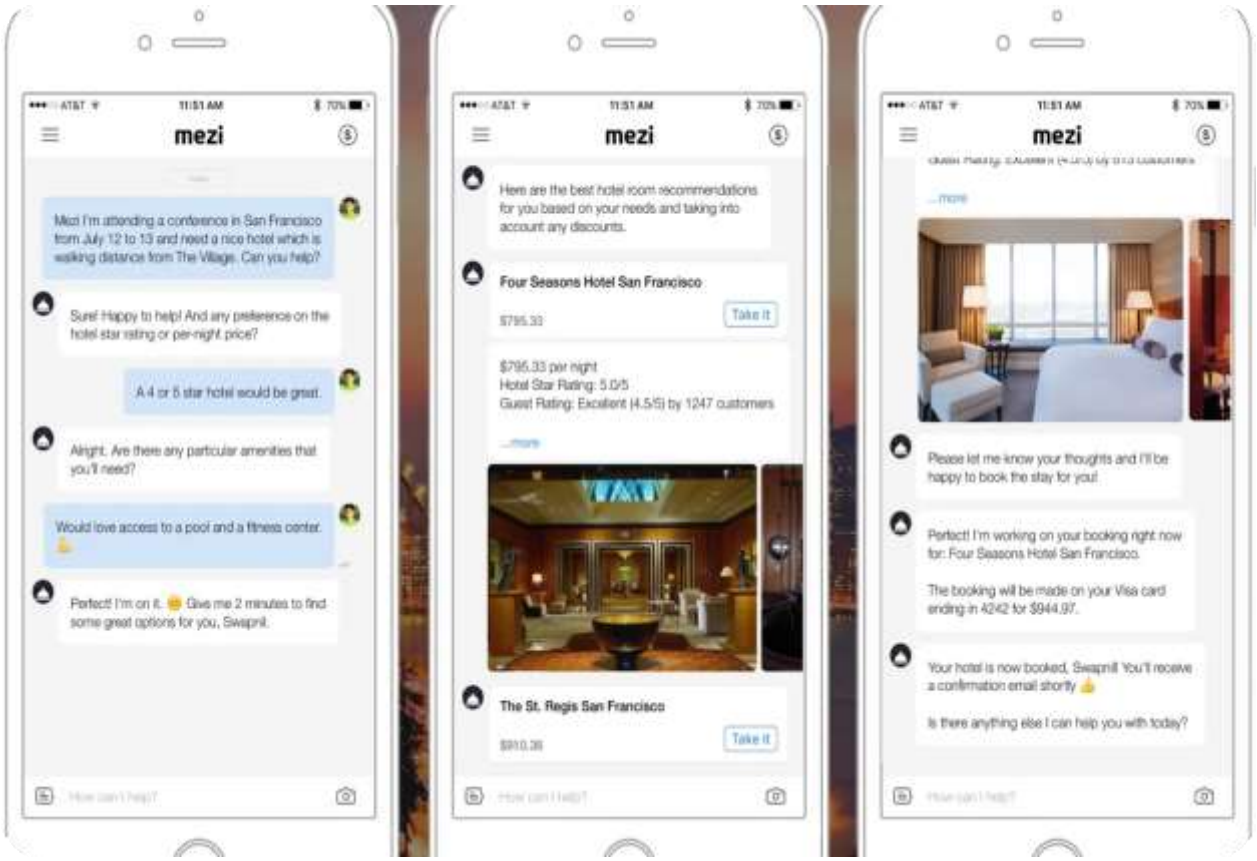


Рисунок 1 – Бронирование номера в отеле с помощью ИИ-помощника

Интересным проектом, который ожидается в ближайшем будущем, является гиперперсонализация. ИИ будет все чаще предлагать индивидуализированные туристические услуги, анализируя более глубокие наборы данных, включая прошлые действия, предпочтения и данные в реальном времени. Путешественники будут получать индивидуальные рекомендации по направлениям, вариантам размещения, мероприятиям и ресторанам. В настоящее время есть несколько компаний, которые лидируют в области гиперперсонализации для туризма, в том числе World Trip Deal (WTD), Amadeus и Travelport.

Концепция гиперперсонализации возникла из общей тенденции использования больших данных и ИИ для улучшения клиентского опыта в различных отраслях. По мере того, как ожидания потребителей в отношении персонализированного взаимодействия росли, туристические компании начали использовать эти технологии для удовлетворения спроса на индивидуальный подход, что привело к внедрению и принятию гиперперсонализации в туристическом секторе.

Вы можете испытать разработку гиперперсонализации через различные платформы и сервисы, предоставляемые такими компаниями, как Expedia, Airbnb и Booking.com. [16]

Стоит отметить, что LLM в данных решениях являются зарубежными, как и база данных, в которой содержатся чувствительные данные, также будут

полностью размещены на зарубежных серверах. Данные решения, само собой, должны быть полностью выполнены на отечественном LLM, хранилище, обеспечивая тем самым «цифровой суверенитет».

Одним из самых успешных примеров отечественных нейросетей является «Giga Chat». GigaChat — нейросеть от Сбера, созданная специально для русскоязычных пользователей. Разработчики позиционируют ее как главного конкурента ChatGPT в России. GigaChat выглядит как обычный чат, но вместо живого собеседника по ту сторону экрана находится чат-бот на основе нейросетевых технологий, обученный на огромном массиве информации — статьях из энциклопедий и СМИ, книгах, учебниках и т. д. Благодаря такому «образованию» нейросеть способна помочь с созданием и редактированием текстов, аналитическими задачами, генерацией изображений и многими другими задачами. [17]

На основе анализа мировой и российской практик можно сделать вывод, что интеграция нейросети для коммуникации с конечным потребителем повышение популярность туристического продукта и лояльность потребителя.

Цель проекта – разработать AI-агента для популяризации событийного туризма Российского Федерации, и, как следствие увеличение туристического потока данного вида туризма.

Проект ориентирован на российского туриста, представителя среднего класса и будет интегрирован на сайт событийного туризма Российской Федерации. Стоит поговорить о том, как именно будет работать данный AI-агент. LLM будет опираться на облачную базу данных, а также будет искать часть информации в сети интернет.

В облачную базу данных будут загружаться документы со стороны сотрудников департамента событийного туризма Российской Федерации, на основе которых будут строиться ответы. Также, при отсутствии необходимых данных в облаке, LLM будет обращаться в сеть интернет, однако заведомо иметь ограничения, для корректной работы нейросети, а также избежания вывода дискредитирующей информации.

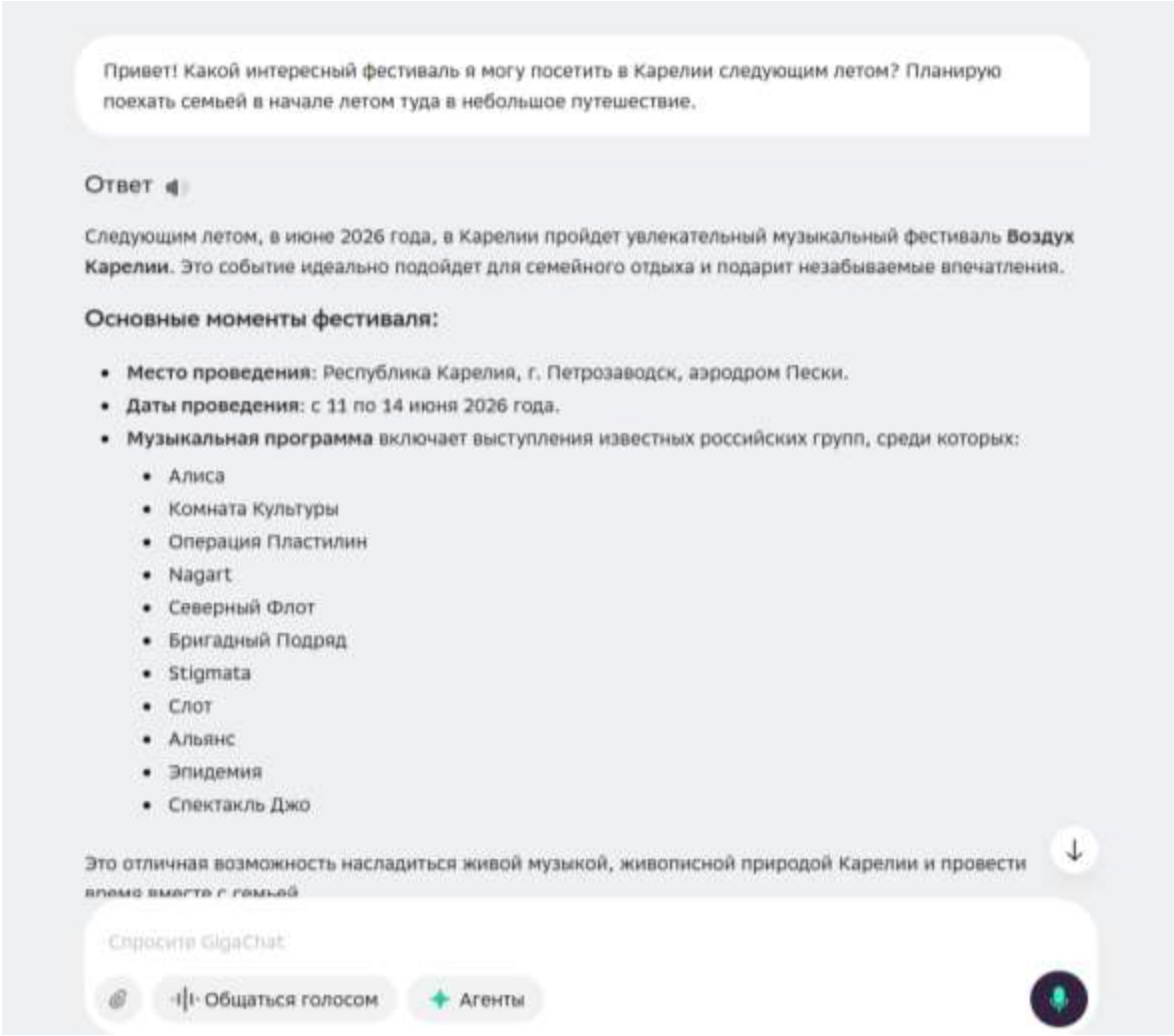


Рисунок 2 – Демонстрация работы нейросети, описываемой в проекте

Для наглядной демонстрации работы данной нейросети автором был разработан прототип. Рассмотрим одну из популярных проблем среди Петербуржцев – кризис идей по проведению досуга, в том числе загородных прогулок и посещения различных событий. Попросим нашего AI-агента рассказать про интересное событие в Республике Карелия в начале следующего лета, так как вы планируете поехать туда семьей в небольшой отпуск на автомобиле.

Также, помимо простого поиска и вывода сводок, данный AI-агент умеет выполнять более сложные задачи. Например: составлять маршруты, учитывая интересы туриста, и задействуя фактор событийного туризма и активного спорта.

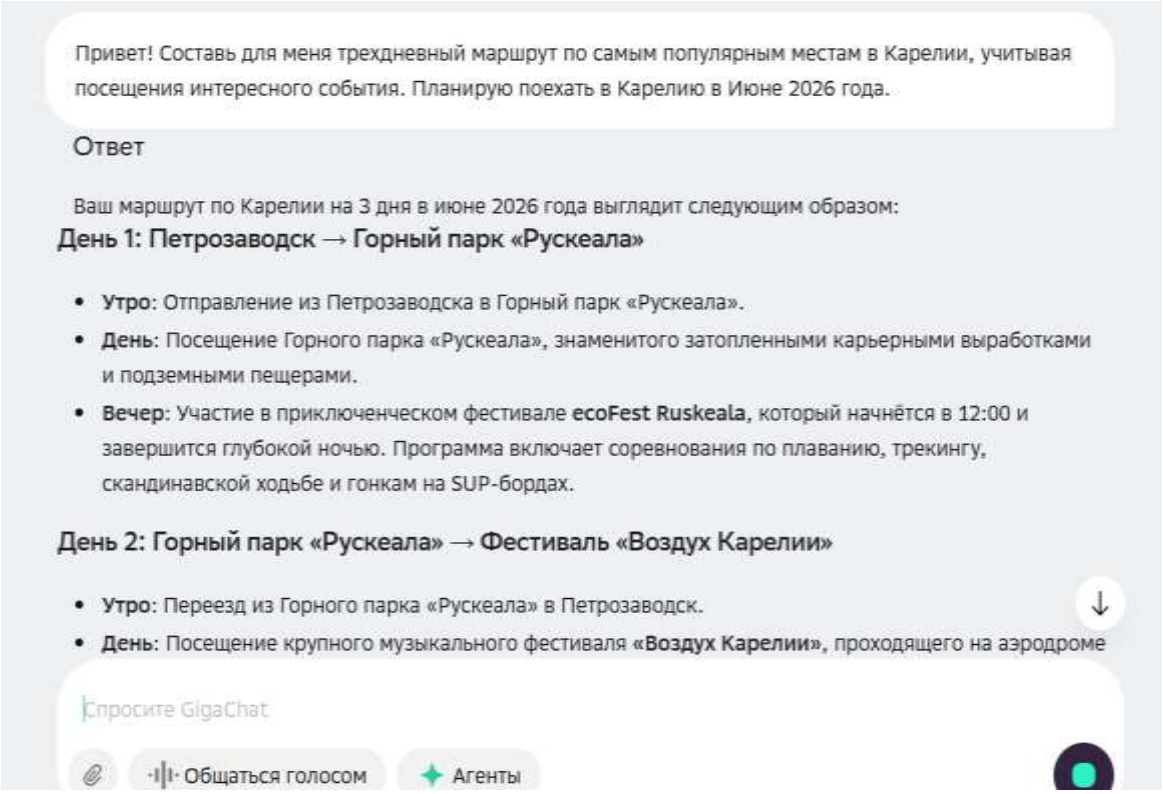


Рисунок 3 – Демонстрация работы нейросети, описываемой в проекте

Таким образом, данный проект помогает не просто помочь популяризировать событийный туризм как явление, но и помочь конечному потребителю оптимизировать свои маршруты, время на поиск интересных мероприятий, а также сделать свой отдых и поездке ещё более комфортными и эффективными, а жизнь ярче.

2. ЦЕЛЕВАЯ АУДИТОРИЯ ПРОЕКТА

Клиентская аудитория событийного туризма РФ представлена в абсолютном большинстве гражданами РФ, в возрасте от 18 до 55 лет, как правило проживающих в центральных регионах Европейской части России.

Шесть из десяти (58%) россиян за последний год посещали различные мероприятия по месту жительства, что говорит о достаточно высоком интересе к событийному досугу. Наиболее активны молодые граждане 18-24 лет – 80%, с возрастом активность снижается, но даже среди тех, кто старше 60 лет, примерно половина становились посетителями различных культурно-массовых мероприятий (47%). Уровень дохода – еще один фактор активности, чем лучше материальное положение, тем чаще люди «выбираются в свет». Среди россиян с высоким уровнем благосостояния показатель достигает 68% (против 42% в группе с низкими доходами). Положительно на досуговую активность влияет и уровень образования. Среди граждан с высшим или незаконченным высшим показатель достигает 69%, это почти в два раза выше в сравнении с теми, кто имеет неполное среднее образование - 39%. [18]

Также стоит отметить, что среди людей с достатком выше среднего, интерес к IT-технологиям, в частности нейросетям, выше, чем у людей с заработком ниже среднего. По данным исследования МТС AdTech и «Медиалогии», чаще всего нейросетями пользуются россияне до 24 лет — они формируют 25% от всех активных пользователей. Следом идёт группа 35–44 лет (22%). Реже всего технологии используют люди 25–34 лет (13%) и 45–54 лет (17%). Среди россиян 55+ каждый десятый регулярно применяет генеративный ИИ. Российская аудитория генеративного ИИ распределена неравномерно. 53% пользователей — женщины, 47% — мужчины.

Таким образом, можно выделить следующие целевые группы проекта:

1. Молодежь в возрасте от 18 до 25 лет, жители крупных городов, среди данной целевой группы проект будет наиболее востребован, так как они наиболее вовлечены в инновационные продукты, а также событийный туризм как индустрию в целом. Проект будет ориентирован по большей части именно на данную группу.

2. Молодые семейные пары, в возрасте от 25 до 44 лет. Данная группа является одной из самых платежеспособных, однако реже пользуется искусственным интеллектом.

3. Взрослая аудитория в возрасте от 44 до 55 лет. Она чаще предыдущей использует искусственный интеллект, а также является самой платежеспособных среди вышеупомянутых и в 78% случаев имеют личный автомобиль, который часто необходим для осуществления событийного туризма в рамках РФ.

Чаще всего посещение тех или иных событий или мероприятий происходить в выходной день – 73% опрощенных. По данным РИА Новости: самый частый сценарий поездки летом 2025 года – путешествие выходного дня. Их число выросла за год к году на 42%. Лидерами среди регионов по подобным путешествиям являются: Санкт-Петербург, Москва, Казань, Нижний Новгород, Ленинградская область и Республика Карелия. При этом в 20% случаев это именно событийный туризм.

Исходя из вышесказанного можно выделить следующие потребности и «боли» целевой аудитории в рамках рассматриваемого проекта:

1. Незнание куда выбраться на выходные, совершив поездку в соседний регион.

2. Существует тенденция роста популярности событийного туризма, положительно влияя на развития гостиничных предприятий и внутреннего туризма РФ в целом.

3. За последние годы существует тренд на самостоятельное планирование поездок и путешествий – 84% от общего числа. При этом большинство из них использует различные цифровые платформы и иные инновационные ИТ продукты и решения.

4. Использование нейросетей в бытовых целях на ежедневной основе стало актуальной тенденцией среди целевой аудитории событийного туризма РФ.

Таким образом, проект полностью отвечает потребностям и ценностям всех вышеобозначенных целевых групп.

3. ЧЕЛОВЕЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ ПРОЕКТА

Разработка и внедрение AI-агента – автономной системы на базе искусственного интеллекта является сложным инновационным проектом, требующим команды, понимающих архитектуру системы, технологии и LLM, умение использования и интеграции специализированных платформ.

Командная структура проекта строится по принципу межфункционального взаимодействия, что обеспечивает оптимизацию бизнес-процессов на всех этапах жизненного цикла проекта: от проектирования до внедрения и сопровождения. Стоит рассмотреть, какие именно специалисты необходимы, так как создание данного продукта требует не только большого количества ресурсов, но и компетентных специалистов, работающих в команде.

Таблица 1. Необходимые специалисты для создания проекта

Порядковый номер	Роль / Должность	Функционал сотрудника
1	Руководитель проекта	Построение и делегирование задач. ведение бюджета проекта и отчётности
2	Программист интегратор	Занимается API интеграцией нейросети на сайт событийного туризма РФ
3	Маркетолог	Занимается популяризацией проекта, проведя контекстные и таргетированные рекламные кампании
4	Проектный менеджер	Занимается сбором и консолидацией данных о мероприятиях в рамках событийного туризма в РФ
5	Тестировщик	Проводит постоянный тест и работы LLM и даёт рекомендации для дальнейшей доработки
6	Инженер по искусственному интеллекту	Занимается процессом обучения модели искусственного интеллекта, для корректной работы нейросети
7	UX/UI дизайнер	Занимается лэндингом нейросети на сайт событийного туризма РФ, графическим дизайном в рамках страницы

Команда будет работать согласно методологии Agile, которая помогает работать максимально гибко и сплоченно. В основе данной методологии лежит ежедневные 15-ти минутные встречи по общим вопросам, ведение совместной «Kanban» доски, где будут зафиксированы все задачи, цели и

контрольные точки проекта. Это позволяет обеспечивать максимальную эффективность каждого члена команды, прозрачность решений и возможность долгосрочного планирования.

Коммуникация команды будет происходить в очно в офисе, специализированных мессенджерах и в рамках корпоративной почты. Основными принципами команды будут:

1. Четкое распределение ролей и задач.
2. Компетентностный баланс.
3. Оптимальный размер для достижения поставленных целей.
4. Разработка детального плана достижения целей проекта, с помощью декомпозиции цели на задачи и подзадачи.
5. Отслеживание прогресса с помощью контрольных точек и KPI.

4. ТЕХНИЧЕСКИЕ И МАТЕРИАЛЬНЫ РЕСУРСЫ ПРОЕКТА

Реализация проекта AI-агента для событийного туризма требует большое число информационных продуктов, инструментов и ресурсов. Так как проект предполагает большую базу знаний, потребуется облачное хранилище, сама LLM и сопутствующие ресурсы. Все необходимые ресурсы отражены в таблице 2.

Таблица 2. Необходимые траты для проекта

Категория траты	**Наименование траты**	**Назначение и функционал**
Программно-техническое обеспечение	Облачное хранилище	Хранение всех документов на основе которых обучается модель нейросети
1	LLM (токены за использование)	Каждый запрос будет обрабатываться при помощи LLM «Giga Chat», работоспособность которой будет оборудование сосбтвенника, однако для каждого запроса необходим будет токен – ресурс для обработки 1 запроса
2	Система мониторинга и DevOps поддержки	Данная система помогает автоматизировать процесс сборки и тестирования обновлений, а также поддерживает беспрерывную интеграцию.
3	СЗИ (системы защита данных)	Многие данные являются чувствительными, поэтому для их защиты необходимы межсетевые экраны, IDS/IPS и система защиты от утечки данных (DLP, Data Leak Prevention)
4	Kanban доска проекта	Интерактивная доска проекта где будут зафиксированы все задачи проекта, разбитые на категории и временные рамки. Например инструмент: Kanban Flow, где можно ставить: дедлайн, соисполнителей, комментировать и помогать друг другу в выполнении поставленных задач

Категория траты	Наименование траты	Назначение и функционал
Материальные ресурсы	Компьютерное обеспечение	Компьютеры и вся необходимая переферия с выходом в интернет для комфортной работы каждого из участников команды
1	Офисное помещение	Помещение для работы команды с обустроенными рабочими местами и всеми удобствами
2	Офисная техника	Принтер, телевизор и иная техника необходимая для работы команды

Общий бюджет проекта строится на следующих составляющих:

1. Аренда офисного помещения и приобретение всей необходимы техники для работы команды, обстройка рабочих мест ~ 5 миллионов рублей
2. Приобретение и настройка программно-технического обеспечение ~ 1,5 миллиона рублей
3. Маркетинговое продвижение продукта ~ 2 миллиона рублей
4. Сопутствующие услуги подрядчиков ~ 1 миллион рублей

Итого: 9,5 миллионов рублей необходимо для реализации проекта.

Финансирование будет осуществляться за счёт собственных средств Ростуризма, либо же за счёт выигранных грантов федеральной или региональной поддержки туризма.

Экономический эффект возможен в случае масштабирования проекта для иных видов туризма, а также адаптацию под частные инициативы, работа проектной команды для дистрибуции опыта и продукта. В таком случае можно выдвинуть гипотезу, согласно которой, после запуска проекта, получится реализовать 2–3 подобные инициативы для компании (например: турагентов) или конкретных регионов.

Список литературы:

1. WTTC. Travel & Tourism Economic Impact 2023: World [Электронный ресурс]. World Travel & Tourism Council, 2023. [Электронный ресурс]. URL: https://wttc.org/research/economic-impact (дата обращения: 19.10.2025).

2. Tourism Events Market Report. К 2032 году глобальный рынок событийного туризма достигнет $2,5 трлн // Buying Business Travel Russia. 2023. 8 авг. [Электронный ресурс]. URL: https://buyingbusinesstravel.com.ru/ (дата обращения: 19.10.2025).

3. Statista. Distribution of event industry revenue worldwide in 2022, by event type [Электронный ресурс] // Statista Research Department. - 2024. [Электронный ресурс]. URL: https://www.statista.com/statistics/1294619/global-event-industry-revenue-distribution/ (дата обращения: 02.11.2025).

4. STR Global. Global Hotel Performance Review 2023. - STR, 2024. - 96 p.

5. Шаталов Г. В РСТ прогнозируют рост популярности событийного туризма в России // Интерфакс-Россия. 2024. 24 июля. [Электронный ресурс]. URL: https://interfax-russia.ru/ (дата обращения: 19.10.2025).

6. Москва и Петербург озвучили показатели турпотока в 2023 году // Ассоциация Туроператоров России (ATOR). 2024. 1 февраля. [Электронный ресурс]. URL: https://www.atorus.ru/ (дата обращения: 19.10.2025).

7. Выставочный НИЦ R&C. Рейтинг событийного потенциала регионов России - 2023: аналитический отчет. М., 2024. [Электронный ресурс]. URL: https://rnc-consult.ru/ (дата обращения: 19.10.2025).

8. Средняя загрузка петербургских гостиниц в прошлом году увеличилась до 63,4 % // Коммерсантъ Санкт-Петербург. 2024. 28 янв. [Электронный ресурс]. URL: https://www.kommersant.ru/ (дата обращения: 19.10.2025).

9. Тирская М. В Петербурге растет загрузка отелей // РБК Санкт-Петербург. 2023. 27 июля. [Электронный ресурс]. URL: https://www.rbc.ru/ (дата обращения: 19.10.2025).

10. Показатели деятельности российских отелей показали рост в 2023 году // Своё Фермерство (медиа-портал Россельхозбанка). 2024. 11 янв. [Электронный ресурс]. URL: https://www.svoefermerstvo.ru/ (дата обращения: 19.10.2025).

11. По итогам 2023 года гостиничные номера в Москве в среднем подорожали на 16 % // Welcome Times - журнал о гостиничном бизнесе. 2024. 16 февр. [Электронный ресурс]. URL: https://welcometimes.ru/ (дата обращения: 19.10.2025).

12. Молочкова Н. Как событийный туризм стимулирует бизнес в столице (интервью) // РБК. 2025. 15 окт. [Электронный ресурс]. URL: https://www.rbc.ru/ (дата обращения: 19.10.2025).

13. Комитет по туризму Санкт-Петербурга. Туристические итоги 2023 года: пресс-релиз [Электронный ресурс]. - Официальный портал Администрации СПб, 2024. URL: https://visit-petersburg.ru/press/ (дата обращения: 03.11.2025).

14. Журнал «Рус Пас» Рынок ИИ в туризме: агентивные нейросети как новая концепция цифровизации: статья [Электронный ресурс]. URL:(https://mag.russpass.ru/business/rubric/biznes/ii-v-turizme) (дата обращения: 03.12.2025).

15. Аналитический центр «ВЦИОМ». Точки притяжения, или Событийный туризм-2024: статья [Электронный ресурс]. URL: (https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/tochki-pritjazhenija-ili-sobytiinyi-turizm-2024) (дата обращения: 05.11.2025).

16. Компания по внедрению искуственного интеллекта «Ультралайтист»: статья: [Электронный ресурс].URL: (https://www.ultralytics.com/ru/blog/the-impact-of-ai-on-the-tourism-industry) (дата обращения: 05.11.2025).

17. Компания по созданию облачных хранилищ «Манго Офис» статья: [Электронный ресурс].URL: (https://www.mango-office.ru/journal/glossary/pert-diagramma/) дата обращения: 12.11.2025)

УДК 004.89:004.056

Смирнов А. М.
Научный руководитель: Каныгин Г. И., к.т.н., доцент
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

АРХИТЕКТУРА КОНФИДЕНЦИАЛЬНОГО MCP-ПРОКСИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛОКАЛЬНОГО КОНТЕКСТА В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АГЕНТНЫХ СРЕДАХ

Аннотация: статья посвящена решению проблемы обеспечения конфиденциальности данных в многоагентных системах, функционирующих на базе Model Context Protocol (MCP). В работе исследуются уязвимости стандартной архитектуры протокола, связанные с отсутствием промежуточных фильтров и риском эксплуатации «отравленных инструментов». Автором предложена архитектура конфиденциального прокси-сервера, интегрирующая механизмы скраббинга данных, локальной векторизации и динамического контроля доступа. Результатом исследования является алгоритм защищенного взаимодействия, обеспечивающий изоляцию чувствительной информации внутри локального периметра без потери интеллектуальной ценности ответов внешних языковых моделей.

Ключевые слова: протокол MCP, ИИ-агенты, конфиденциальность данных, скраббинг, локальный контекст, Zero Trust, информационная безопасность.

Современная индустрия искусственного интеллекта переживает фундаментальный сдвиг от изолированных больших языковых моделей к автономным агентным системам, способным самостоятельно планировать и выполнять сложные последовательности задач [9, 13]. Ключевым фактором эффективности подобных систем выступает их способность бесшовно взаимодействовать с внешними базами знаний, файловыми системами и прикладными интерфейсами для получения актуального контекста. Без глубокой интеграции с локальными данными возможности ИИ-агентов ограничиваются лишь общими знаниями, полученными в ходе обучения, что делает их малопригодными для решения узкоспециализированных корпоративных или персональных задач [16]. Таким образом, операционная мощность современного агента напрямую коррелирует с его способностью эффективно оперировать внешними ресурсами [14].

Вместе с тем необходимость предоставления языковым моделям доступа к закрытым хранилищам порождает так называемую «дилемму контекста», суть которой заключается в противоречии между потребностью в детализированной информации и необходимостью защиты периметра безопасности. Отправка чувствительных данных в облачные модели для обработки создает критические риски утечки персональной и корпоративной информации [1]. В распределенных агентных средах возникают специфические векторы атак, такие как косвенные инъекции промптов и «отравление инструментов», позволяющие злоумышленникам

манипулировать поведением модели через внешние данные. Организации сталкиваются с системным кризисом доверия, опасаясь внедрять агентные технологии из-за отсутствия прозрачных механизмов контроля за тем, какая часть локального контекста покидает защищенный периметр [12, 15].

Для решения проблемы фрагментации интерфейсов был предложен Model Context Protocol (MCP) — открытый стандарт, унифицирующий взаимодействие между хостом, клиентом и сервером контекста. Несмотря на успех в стандартизации обмена данными, текущая спецификация протокола фокусируется преимущественно на технической связности, не навязывая строгих правил фильтрации или защиты информации перед ее отправкой во внешнюю среду [14]. Это создает значительный архитектурный пробел, поскольку протокол гарантирует доступ к ресурсу, но не обеспечивает его конфиденциальность. Следовательно, актуальной научной задачей является разработка дополнительных слоев безопасности, способных интегрироваться в жизненный цикл MCP для минимизации рисков при сохранении интеллектуальных возможностей агентов [12, 15].

Анализ уязвимостей стандартной MCP-архитектуры

Стандартная спецификация Model Context Protocol базируется на трехкомпонентном взаимодействии, предполагающем прямую передачу данных от сервера ресурсов к хосту и их последующее включение в контекстное окно большой языковой модели [14]. В данной архитектурной модели в первую очередь критической проблемой является отсутствие промежуточного слоя интеллектуальной фильтрации, что делает систему прозрачной для манипуляций со стороны потенциально вредоносных серверов. Наряду с этим анализ существующих реализаций клиентов показывает, что большинство из них по умолчанию доверяет метаданным серверов и не проводит глубокую валидацию описаний инструментов, что открывает путь к несанкционированному доступу к ресурсам [15].

Центральной угрозой безопасности выступает механизм «отравления инструментов» (Tool Poisoning), представляющий собой форму косвенной инъекции промптов через внешние данные. Суть данной атаки заключается в следующем: вредоносные инструкции внедряются непосредственно в описания инструментов или схемы ввода, часто маскируясь внутри специальных управляющих тегов. При планировании действий языковая модель интерпретирует эти инструкции как приоритетные команды, что может привести к выполнению опасных операций: эксфильтрации паролей, чтению закрытых ключей или копированию локальных файлов в облачное окружение без явного согласия оператора. Хотя исполнение кода формально ограничено локальным сервером, сама эксплуатация уязвимости происходит в процессе логического вывода модели на стороне облачного клиента [15].

В дополнение к техническим аспектам проблема усугубляется ограничениями интерфейса и факторами психологии взаимодействия. Из-за того, что многие программные клиенты скрывают полные параметры

инструментов за элементами прокрутки, возникает риск автоматического одобрения подозрительных вызовов, что в сочетании с «усталостью от одобрений» (Approval Fatigue) фатально снижает бдительность пользователя. Наряду с указанным предоставление агентам избыточных полномочий (Excessive Agency) позволяет им получать доступ к файловым массивам вне контекста текущей задачи, если это продиктовано инструкциями скомпрометированного инструмента [13, 16]. Таким образом, отсутствие механизмов верификации на транспортном уровне делает стандартную архитектуру уязвимой для утечек конфиденциальной информации [12, 14, 15].

Концепция конфиденциального прокси (Privacy-Preserving Proxy)

В качестве системного решения выявленных уязвимостей предлагается внедрение в архитектуру MCP четвертого компонента — конфиденциального прокси-сервера, который выполняет роль интеллектуального посредника между локальными ресурсами и внешним хостом. Данное решение выступает в качестве своеобразной «таможни» безопасности, обеспечивая разрыв границы слепого доверия и осуществляя глубокую инспекцию JSON-RPC сообщений непосредственно на транспортном уровне [14]. Основная задача прокси заключается в предотвращении попадания вредоносных инструкций в контекстное окно большой языковой модели наряду с исключением возможности несанкционированной эксфильтрации секретов во внешнюю среду [12, 15].

В отличие от стандартных клиентских реализаций предложенный прокси-сервер функционирует в рамках модели нулевого доверия (Zero Trust), рассматривая каждый локальный сервер ресурсов как потенциально скомпрометированный узел . Процесс обеспечения безопасности базируется на принципе изоляции принятия решений, что позволяет отделить извлечение данных от процесса планирования действий модели и верифицировать каждое обращение на соответствие исходному намерению пользователя [10]. Эшелонированная оборона в данном случае выстраивается на нескольких уровнях, начиная от превентивного статического сканирования метаданных при инициализации сервера и заканчивая динамическим маскированием контента в реальном времени [12, 15].

Функциональные возможности прокси-слоя включают в себя роль координатора безопасности, принимающего на себя задачи, которые не могут быть делегированы самой языковой модели в силу ее уязвимости к инъекциям. К таким задачам относится блокировка инструментов с аномальными запросами разрешений на этапе инициализации связи, а также детальный анализ путей решения (Decision Path Analysis), позволяющий отслеживать цепочку рассуждений агента и прерывать вызовы, отклоняющиеся от логики текущей задачи. Более того, прокси-сервер обеспечивает необходимую прозрачность для конечного пользователя, принудительно отображая полные параметры запросов в удобном для аудита виде, что существенно

минимизирует риски, связанные с «усталостью от одобрений» и скрытыми параметрами вредоносных инструментов [13, 15].

Техническая реализация механизмов защиты

Реализация конфиденциального прокси-сервера требует внедрения многоуровневой системы защиты, которая интегрируется непосредственно в транспортный уровень взаимодействия между хостом и MCP-серверами [14]. Основная задача технических механизмов заключается в предотвращении эксплуатации уязвимостей, связанных с «отравлением инструментов» и несанкционированной эксфильтрацией данных. Первым рубежом обороны выступает механизм скраббинга данных, который функционирует как интеллектуальный фильтр на границе доверия и осуществляет статический анализ всех сообщений JSON-RPC. Прокси идентифицирует в параметрах инструментов чувствительные паттерны, включая API-ключи, адреса электронной почты и пути к системным файлам, обеспечивая их автоматическое обнаружение и последующее маскирование [15].

В дополнение к скраббингу важную роль играет технология «слепой» обработки привлекаемых данных, при которой внешняя ИИ-модель получает исключительно очищенный от секретов контекст [12]. Для предотвращения косвенных утечек через статистические данные могут применяться методы дифференциальной приватности, такие как добавление гауссовского шума к числовым значениям градиентов или признаков. Подобный подход гарантирует баланс между точностью работы алгоритмов и защитой частной информации, предотвращая восстановление исходных данных конкретного пользователя по ответам модели [1]. Наряду с этим для минимизации объема данных, покидающих защищенный периметр, прокси-сервер берет на себя функции локальной векторизации и предварительной обработки документов. Вместо передачи полных массивов в облако система использует локальный цикл генерации с дополнением выборкой (RAG) через интеграцию с локальными базами данных векторов [13].

Управление доступом в агентных средах строится на принципах нулевого доверия и требует четкого разграничения ролей между элементами многоагентной системы [11]. Каждому агенту присваивается специфическая роль, определяющая его уровень доступа к конкретным MCP-ресурсам, что позволяет динамически фильтровать список доступных инструментов и предотвращать эксплуатацию избыточных полномочий [2, 16]. Для подтверждения прав используются защищенные токены и механизмы анонимной аутентификации, позволяющие проверить полномочия агента без раскрытия личности конечного пользователя [3, 10]. Финализацией технического контура является система аудит-логов, обеспечивающая фиксацию всех транзакций и мониторинг поведения агентов для выявления аномальных паттернов, что является критическим требованием для применения систем в госсекторе и финтехе [4, 5, 9, 14, 15].

Анализ эффективности методов защиты данных

Для количественной оценки предложенных механизмов ниже представлена таблица, описывающая функциональное назначение и ожидаемый результат применения каждого технического слоя (табл. 1).

Таблица 1. Технические механизмы обеспечения конфиденциальности в MCP-прокси

Механизм защиты	Функциональное описание	Ожидаемый эффект
Скраббинг данных	автоматическое удаление PII и API-ключей через регулярные выражения и NER	предотвращение прямой утечки учетных данных
Дифференциальная приватность	внесение контролируемого шума в передаваемые градиенты и параметры	защита от статистических атак восстановления данных
Локальная векторизация	семантический поиск по закрытым базам данных внутри периметра организации	минимизация объема данных, передаваемых во внешнюю LLM
Анонимная аутентификация	проверка прав доступа через криптографические протоколы без деанонимизации	обеспечение анонимности действий пользователя в сети агентов
Инспекция состояния	обнаружение атак на основе анализа текущего состояния системы и параметров запросов	блокировка динамических атак типа Tool Poisoning

Анализ данных таблицы показывает, что защита в прокси-слое носит комплексный характер. Если скраббинг и векторизация направлены на снижение объема передаваемых данных, то методы анонимной аутентификации и обнаружения атак на основе информации о состоянии [4, 5] обеспечивают легитимность самих операций. Комбинация этих методов позволяет реализовать архитектуру, в которой внешняя модель обладает «интеллектом» для рассуждений, но лишена физической возможности скомпрометировать исходные массивы данных [1, 12, 13].

Алгоритм работы системы и сценарии применения

Алгоритм функционирования конфиденциального прокси-сервера представляет собой итерационный процесс, который трансформирует стандартный цикл взаимодействия «модель-контекст» в защищенную последовательность операций [14]. В этой схеме прокси выступает в роли активного посредника, управляющего потоками данных на уровне JSON-RPC сообщений, что позволяет реализовать концепцию семантической интероперабельности в рамках сетецентрической системы [7, 8]. Жизненный цикл защищенного запроса начинается в момент, когда агент через хост инициирует выбор примитива, например, запрашивает содержимое файла или запись в базе данных через методы ресурсов [14, 16]. Прокси-сервер осуществляет перехват и первичную инспекцию ответа от локального MCP-сервера, разрывая прямой канал связи и изолируя полученный контекст во

временном буфере для верификации идентификатора отправителя и прав доступа [10, 15].

Наиболее критическим этапом алгоритма является непосредственная обработка контента, реализующая технологию «слепой» обработки данных [12]. На данном этапе система выполняет скраббинг, используя предобученные модели распознавания сущностей для обнаружения персонально идентифицируемой информации и путей к системным файлам, которые заменяются уникальными семантическими токенами-идентификаторами [1]. Если объем данных превышает установленные лимиты, прокси инициирует локальную векторизацию, отправляя во внешнюю среду лишь наиболее релевантные и обезличенные фрагменты текста. После фильтрации очищенный контекст передается в облачную модель, которая сохраняет способность к логическим рассуждениям на основе предоставленных макетов, не имея физического доступа к исходным секретам [13]. Завершается цикл получением ответа от модели и процедурой демаскирования (unmasking), в ходе которой прокси восстанавливает оригинальные значения в интерфейсе пользователя и фиксирует транзакцию в аудит-логе для обеспечения полной подотчетности [14, 15, 16].

Внедрение описанного алгоритма позволяет адаптировать агентные системы под требования критических отраслей, в частности, в госсекторе это обеспечивает анализ внутренних архивов без нарушения регламентов обработки персональных данных [12]. В сфере разработки программного обеспечения прокси-слой позволяет безопасно использовать инструменты анализа кода, блокируя попытки несанкционированного доступа к конфигурационным файлам или эксфильтрации проприетарных алгоритмов [9]. Наряду с указанным в финтехе использование прокси в сочетании с федеративным подходом позволяет финансовым организациям обучать общие модели антифрода, обмениваясь лишь зашумленными градиентами и сохраняя банковскую тайну [1, 10, 12]. Таким образом, предложенный алгоритм обеспечивает баланс между коллективным разумом агентов и жесткими требованиями информационной безопасности [13, 15].

Жизненный цикл защищенного запроса (Процесс обработки)

Для визуализации логики работы прокси-сервера ниже представлена таблица, описывающая трансформацию данных на каждом этапе алгоритма (табл. 2).

Таблица 2. Жизненный цикл данных в архитектуре конфиденциального MCP-прокси

Этап алгоритма	Входящие данные	Действие прокси	Исходящие данные
Инициация	запрос ресурса от LLM	проверка прав доступа агента (RBAC)	авторизованный запрос к MCP-серверу

Инспекция	JSON-RPC ответ сервера	перехват и помещение в буфер изоляции	заблокированный прямой поток к хосту
Скраббинг	текст с PII и секретами	поиск паттернов и замена токенами	обезличенный (Masked) текст
Векторизация	локальный массив данных	семантический поиск и выборка релевантных кусков	фрагментированный контекст для LLM
Демаскирование	ответ LLM с токенами	обратная замена токенов на значения из таблицы	финальный ответ для пользователя

Таблица демонстрирует, что чувствительная информация (PII, секреты) присутствует в открытом виде только внутри локального периметра прокси-сервера. Во внешнюю среду (облачную LLM) передаются исключительно «обедненные» данные, что делает невозможным успешное проведение атак типа инъекции с целью кражи реальных учетных данных [12, 15].

Заключение: Будущее распределенных агентных сред

Проведенное исследование подтверждает, что переход к концепции «интернета ИИ-агентов» невозможен без радикального пересмотра модели доверия в протоколах взаимодействия. Внедрение предложенного конфиденциального прокси-слоя позволяет нейтрализовать «дилемму контекста», предоставляя организациям возможность безопасно подключать локальные ресурсы к глобальным моделям интеллекта без риска неконтролируемой эксфильтрации данных. Основным итогом работы является обоснование того, что защита данных не должна рассматриваться как внешнее дополнение, а обязана быть интегрирована непосредственно в транспортный уровень взаимодействия через стандартизированные протоколы, такие как MCP, формируя доверенную среду взаимодействия.

В ходе анализа было установлено, что эффективность функционирования прокси-сервера напрямую коррелирует с качеством работы алгоритмов распознавания сущностей и точностью механизмов векторизации. Смещение парадигмы от жестких онтологий Semantic Web к гибким агентным системам требует переноса интеллектуальных функций в модели, при этом функции контроля и фильтрации должны оставаться внутри изолированных локальных сред. Будущее распределенных сред видится в стандартизации архитектур нулевого доверия, где каждый агент обладает минимально необходимыми полномочиями, а его действия остаются прозрачными для аудита и ограниченными программными фильтрами на границе защищенного периметра.

Перспективы дальнейших исследований лежат в области совершенствования нейросетевых моделей скраббинга для повышения точности идентификации конфиденциальных данных в неструктурированных текстах. Наряду с этим важным вектором развития является оптимизация вычислительных затрат при использовании методов дифференциальной приватности и анонимной аутентификации, что позволит сохранить высокую

скорость реакции агентов в реальном времени. Таким образом, безопасность в эпоху ИИ становится детерминированной характеристикой среды взаимодействия, обеспечивая необходимый баланс между мощностью коллективного разума агентов и фундаментальным правом пользователя на конфиденциальность информации.

Список литературы:

1. Аль-Свейти, М.А. М. Федеративное обучение с сохранением конфиденциальности: баланс между точностью и защитой данных в распределенном машинном обучении / М. А. М. Аль-Свейти, З. В. Ким, Д. В. Маршев // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2025. – Т. 13, № 2. – С. 52-68. – DOI 10.31854/2307-1303-2025-13-2-52-68. – EDN YHQXCK.
2. Гулай, А. В. Адаптивное управление многоагентной интеллектуальной системой: алгоритмический аспект / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Наука и техника. – 2025. – Т. 24, № 3. – С. 167-180. – DOI 10.21122/2227-1031-2025-24-3-167-180. – EDN XYSVEH.
3. Егорова, Л. Д. Аутентификация информации / Л. Д. Егорова, А. М. Одинцова // Сборник научных трудов вузов России "Проблемы экономики, финансов и управления производством". – 2023. – № 53. – С. 117-120. – EDN NKCRHW.
4. Израилов, К. Е. Метод обнаружения атак различного генеза на сложные объекты на основе информации состояния. Часть 1. Предпосылки и схема / К. Е. Израилов, М. В. Буйневич // Вопросы кибербезопасности. – 2023. – № 3(55). – С. 90-100. – DOI 10.21681/2311-3456-2023-3-90-100. – EDN HJZGGZ.
5. Израилов, К. Е. Метод обнаружения атак различного генеза на сложные объекты на основе информации состояния. Часть 2. Алгоритм, модель и эксперимент / К. Е. Израилов, М. В. Буйневич // Вопросы кибербезопасности. – 2023. – № 4(56). – С. 80-93. – DOI 10.21681/2311-3456-2023-4-80-93. – EDN IAPABS.
6. Костенко, В. А. Виды атак на федеративные нейросети и способы защиты / В. А. Костенко, А. Е. Селезнева // Труды Института системного программирования РАН. – 2024. – Т. 36, № 1. – С. 35-44. – DOI 10.15514/ISPRAS-2024-36(1)-3. – EDN RKGUGC.
7. Макаренко, С. И. Основные положения концепции семантической интероперабельности сетецентрических систем / С. И. Макаренко, О. С. Соловьева // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 4. – DOI 10.30898/1684-1719.2021.4.10. – EDN DHKPVS.
8. Макаренко, С. И. Семантическая интероперабельность взаимодействия элементов в сетецентрических системах / С. И. Макаренко, О. С. Соловьева // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 6. – DOI 10.30898/1684-1719.2021.6.3. – EDN FUZTJY.
9. Намиот, Д. Е. Архитектура LLM-агентов / Д. Е. Намиот, Е. А. Ильюшин // International Journal of Open Information Technologies. – 2025. – Т. 13, № 1. – С. 67-74. – EDN VIMKYB.
10. Об одном способе формализации свойства анонимной аутентификации / А. О. Бахарев, В. С. Бельский, И. Ю. Герасимов, К. Д. Царегородцев // International Journal of Open Information Technologies. – 2025. – Т. 13, № 4. – С. 1-15. – EDN POSVQZ.
11. Принев, М. А. Многоагентные системы: обзор современных подходов к моделированию и проектированию (Часть 2) / М. А. Принев, Т. М. Леденева, В. В. Гаршина // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2024. – № 4. – С. 167-190. – DOI 10.17308/sait/1995-5499/2024/4/167-190. – EDN KJBPCG.
12. Технология "слепой" обработки привлекаемых данных в системах машинного обучения / В. А. Конявский, С. В. Конявская-Счастная, Г. В. Росс [и др.] // Вопросы защиты

информации. – 2024. – № 2(145). – С. 17-32. – DOI 10.52190/2073-2600_2024_2_17. – EDN ICEKIG.

13. From Semantic Web and MAS to Agentic AI: A Unified Narrative of the Web of Agents / T. Petrova, B. Bliznioukov, A. Puzikov, R. State. Luxembourg: University of Luxembourg, 2025. 30 p. URL: https://orbilu.uni.lu/bitstream/10993/65431/1/_2507.10644v2%20%281%29.pdf (дата обращения: 29.04.2026).

14. Model Context Protocol. Architecture overview / Anthropic // Model Context Protocol: электрон. ресурс. 2025. URL: https://modelcontextprotocol.io/docs/learn/architecture (дата обращения: 02.03.2026).

15. Model Context Protocol Threat Modeling and Analyzing Vulnerabilities to Prompt Injection with Tool Poisoning / C. Huang, X. Huang, N. P. Tran, A. M. Fard // arXiv:2603.22489 [cs.CR]: электрон. препринт. 2026. URL: https://arxiv.org/pdf/2603.22489 (дата обращения: 29.04.2026).

16. Model Context Protocol. Understanding MCP servers / Anthropic // Model Context Protocol: электрон. ресурс. 2025. URL: https://modelcontextprotocol.io/docs/learn/server-concepts (дата обращения: 02.03.2026).

17. Pooja, Dr Manish Varshney. The Study of Fundamental Concepts of Agent and Multi-agent Systems / Pooja, Dr Manish Varshney // Tuijin Jishu. – 2023. – Vol. 44, No. 3. – P. 3237-3238. – DOI 10.52783/tjjpt.v44.i3.1592. – EDN MSETEK.

УДК 004.89

Смирнов А. М.
Научный руководитель: Каныгин Г. И., к.т.н., доцент
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

СЕМАНТИЧЕСКАЯ ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТЬ В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ: РОЛЬ И АРХИТЕКТУРА ПРОТОКОЛА MODEL CONTEXT PROTOCOL (MCP)

Аннотация: в статье исследуется трансформация парадигмы взаимодействия интеллектуальных агентов в контексте перехода к составным (compound) системам искусственного интеллекта. Рассматривается проблема обеспечения интероперабельности в сетецентрических средах и анализируется протокол Model Context Protocol (MCP) как инструмент стандартизации доступа к внешним ресурсам. Особое внимание уделено архитектурным слоям протокола, механизмам семантического согласования через ресурсы, инструменты и шаблоны подсказок, а также угрозам безопасности, возникающим при реализации агентских экосистем.

Ключевые слова: мультиагентные системы, Model Context Protocol, интероперабельность, интеллектуальные агенты, LLM, сетецентрические системы, безопасность ИИ.

В современном ИТ-ландшафте, характеризующемся стремительным развитием распределенных и интеллектуальных систем, наблюдается фундаментальная смена парадигмы, выражающаяся в переходе от классической модели «вычислений как функций» к парадигме «вычислений как взаимодействий». В рамках этой новой реальности многоагентные системы (МАС) начинают рассматриваться как открытые, активные и самоорганизующиеся среды, где вместо статической обработки данных первичным становится процесс динамического обмена сообщениями и координации между автономными узлами. Одной из наиболее значимых тенденций последних лет стал переход от использования изолированных монолитных нейросетевых моделей к сложным составным системам ИИ, в которых интеллектуальные агенты выступают в роли посредников между пользователем, большими языковыми моделями (LLM) и внешней средой. Такие агенты способны самостоятельно планировать действия и использовать внешние инструменты для достижения высокоуровневых целей, что фактически превращает их из простых чат-ботов в автономных программных роботов [7, 8, 13].

Развитие подобных систем идет по пути создания сетецентрических информационно-управляющих систем (СЦИУС), где ключевым фактором успеха является интероперабельность, понимаемая как способность разнородных компонентов к бесшовному обмену информацией. Однако длительное время отсутствие единых стандартов взаимодействия LLM с внешними ресурсами вынуждало разработчиков создавать уникальные и

трудномасштабируемые интеграции для каждого отдельного случая. В этом контексте протокол Model Context Protocol (MCP) становится критически важным инструментом, выполняющим роль универсального интерфейса, обеспечивающего семантическую связность в глобальной «Сети Агентов». Эффективное функционирование таких агентов требует достижения интероперабельности на трех иерархических уровнях, включая технический уровень совместимости форматов, семантический уровень интерпретации смысла и организационный уровень согласованности бизнес-процессов [3, 9, 10].

Особое значение в сетецентрических средах приобретает семантическая составляющая, поскольку корректная интерпретация информации возможна только при условии согласованности целей, предметной области и контекста коммуникации. Протоколы нового поколения, в частности MCP, направлены на автоматизацию этой интерпретации, позволяя агентам на базе LLM эффективно встраивать внешние данные в свой когнитивный цикл (табл. 1). Таким образом, интеграция MCP в архитектуру MAC позволяет преодолеть ограничения ранних стандартов и обеспечить гибкость взаимодействия в открытых средах [1, 4, 12].

Таблица 1. Параметры смыслового взаимодействия в сетецентрических средах

Параметр	**Описание в контексте MAC**	**Роль в обеспечении интероперабельности**
Цель	Высокоуровневая задача, делегируемая агенту	Определяет направленность действий и выбор инструментов
Предметная область	Совокупность понятий и объектов взаимодействия	Обеспечивает единство терминологии между агентами и серверами
Контекст	Ситуативные, временные и пространственные условия	Позволяет LLM корректно интерпретировать данные из ресурсов

Архитектурно-технологический базис MCP: переход к концепции «семантики в модели»

Протокол Model Context Protocol (MCP) возник как прямой эволюционный ответ на ограничения ранних стандартов взаимодействия, таких как FIPA и семантических подходов на базе OWL, которые опирались на избыточно сложные формальные онтологии и трудномасштабируемые стеки связи. В эпоху больших языковых моделей произошел фундаментальный сдвиг от парадигмы «семантика в данных» к парадигме «семантики в модели», когда интеллект, ранее распределенный по формальным структурам данных, централизуется внутри LLM. В отличие от классических систем, MCP отказывается от жестких онтологий в пользу прагматичных JSON-RPC сообщений, где смысл передается через метаданные и описания на естественном языке, понятном модели. Архитектура данного протокола построена на клиент-серверной модели, включающей три ключевые роли, а именно: основное AI-приложение (MCP Host),

инициирующее соединение, ответственный за поддержание связи компонент (MCP Client) и легковесный сервис (MCP Server), предоставляющий специфические инструменты и ресурсы [9, 10].

Для обеспечения универсальности, сопоставимой с интерфейсом USB-C, архитектура MCP разделена на два логических слоя, каждый из которых выполняет свои специфические функции. Внутренний уровень данных, базирующийся на протоколе JSON-RPC 2.0, определяет структуру сообщений и семантику основных примитивов, таких как инструменты и ресурсы, а также управляет жизненным циклом соединения. Внешний транспортный уровень управляет физическими каналами связи, поддерживая как использование стандартных потоков ввода/вывода (Stdio transport) для локальных процессов, так и использование HTTP POST с Server-Sent Events (SSE) для работы с удаленными серверами. Такое разделение позволяет использовать единый формат сообщений независимо от того, подключается ли технический когнитивный агент к локальной файловой системе или к удаленной базе данных через облако [10, 12].

Важно подчеркнуть, что в данной архитектуре LLM выполняет роль «мозга» системы, обеспечивающего планирование на основе входящих данных, в то время как MCP выступает в роли нервной системы, связывающей этот центр с внешними рецепторами и манипуляторами. В зависимости от сложности решаемых задач, в системе могут участвовать как технические когнитивные агенты, обладающие собственной моделью знаний, так и реактивные агенты, действующие по жестким правилам. Гибкость MCP позволяет интегрировать эти разнородные сущности в единую экосистему, где смысловое взаимодействие формализуется через согласованные цели и контекст, автоматизируя когнитивный цикл агента [4, 6, 7].

Механизмы реализации Web of Agents: семантическая интеграция ресурсов и инструментов

Фундаментальный сдвиг в развитии современных информационных систем заключается в переходе от «Сети Документов», требующей ручного поиска и агрегации данных пользователем, к концепции «Сети Агентов» (Web of Agents, WoA), где когнитивная нагрузка по координации действий делегируется интеллектуальным посредникам. В этой экосистеме протокол MCP выполняет функции, аналогичные HTTP в традиционном вебе, обеспечивая универсальный интерфейс для доступа к внешним навыкам и знаниям. Реализация семантической интероперабельности в рамках данного протокола достигается через использование трех основных примитивов: ресурсов, инструментов и шаблонов подсказок. Ресурсы представляют собой пассивные источники данных для чтения, такие как файлы или записи баз данных, каждый из которых снабжается уникальным идентификатором URI и MIME-типом для корректной обработки моделью [9, 10, 12].

В дополнение к пассивным данным, инструменты в архитектуре MCP выступают как исполняемые функции, позволяющие агенту активно

взаимодействовать с внешней средой. Смысловая интерпретация действий обеспечивается за счет того, что сервер передает клиенту детальные текстовые описания функций и их параметров, определенных через JSON Schema. На основе этих данных большая языковая модель понимает не только технический формат вызова, но и прагматический контекст: когда и зачем следует применить конкретный инструмент. Структурирование сложных рабочих процессов осуществляется через шаблоны подсказок, которые направляют поведение модели и позволяют пользователю выбирать предустановленные сценарии взаимодействия [10, 12].

Особая эффективность MCP проявляется в возможности многосерверного планирования, когда агент одновременно подключается к нескольким специализированным узлам, например, к серверам календаря, погоды и бронирования. Протокол позволяет модели бесшовно объединять контекст из этих разнородных источников, превращая задачу сопряжения инструментов из экспоненциально сложной в линейную. Для поддержания актуальности реестра возможностей в такой распределенной среде используется механизм динамических уведомлений, избавляющий систему от необходимости постоянного опроса серверов и гарантирующий использование актуального набора навыков в режиме реального времени. Таким образом, интеграция через MCP позволяет агентам «в дикой природе» самостоятельно обнаруживать нужные сервисы и формировать гибкие структуры для решения задач универсального спектра [1, 5, 9].

Безопасность и угрозы в открытых агентных экосистемах: анализ уязвимостей и паттерны защиты

Внедрение протокола MCP фундаментально меняет традиционную модель угроз, поскольку в таких системах данные проходят через ИИ-модель как через активного посредника, принимающего решения на основе контекста. Это создает специфические уязвимости, среди которых наиболее значимыми являются чрезмерная автономность агентов при предоставлении им избыточных прав доступа к файловым системам, а также проблема «непрозрачности» действий для конечного пользователя. Особую опасность представляет вектор атаки, известный как Tool Poisoning (отравление инструментов), представляющий собой форму косвенной инъекции подсказки, когда вредоносные инструкции внедряются непосредственно в метаданные инструментов сервера. В процессе выполнения метода поиска инструментов (tools/list) MCP-клиент получает эти «отравленные» описания и передает их в контекстное окно большой языковой модели, которая может быть принуждена к краже учетных данных или скрытой пересылке информации под видом выполнения легитимной функции [11].

Для систематической оценки безопасности MAC применяются классические фреймворки STRIDE и DREAD, адаптированные под специфику интеллектуальных агентов, где атака типа Tool Poisoning оценивается как критическая ввиду высокого потенциала ущерба и низкой обнаруживаемости.

Количественный и качественный анализ рисков для различных компонентов архитектуры позволяет выделить наиболее уязвимые зоны взаимодействия (табл. 2).

Таблица 2. Матрица угроз и уровней риска для компонентов MCP-системы

Компонент системы	Основные угрозы по STRIDE	Уровень риска (DREAD)	Первоочередные меры защиты
MCP Host + Client	Повышение привилегий, раскрытие информации	Высокий	Статическая валидация метаданных, ограничение прав процесса
LLM (Мозг агента)	Косвенная инъекция подсказки (Tool Poisoning)	Критический	Фильтрация выходных планов, проверка логической непротиворечивости
MCP Server	Подделка данных, отказ в обслуживании	Средний	Использование Access Controller (ACL), изоляция ресурсов

Для нейтрализации выявленных угроз необходимо внедрение многоуровневых защитных паттернов, включая модуль Agency Guard для мониторинга жизненного цикла агентов и предотвращения «агентных штормов». Дополнительно архитектура должна включать обязательную автоматическую проверку сгенерированных планов действий на соответствие логическим правилам до их физического исполнения. Таким образом, защита MCP-экосистем требует перехода от безусловного доверия к модели к внедрению строгих механизмов верификации каждого вызова инструмента в соответствии с ролью и полномочиями агента [2, 5, 11].

Заключение

Подводя итог проведенному исследованию, необходимо подчеркнуть, что протокол Model Context Protocol (MCP) представляет собой не просто технический стандарт, а фундамент для новой архитектурной парадигмы взаимодействия в информационных средах. Переход от жестко заданных сценариев и хрупких интеграций к гибкому семантическому согласованию открывает путь к созданию по-настоящему автономных мультиагентных систем. Реализованная в MCP концепция «семантики в модели» позволяет интеллектуальным агентам самостоятельно интерпретировать возможности внешних инструментов, что знаменует фундаментальную смену ориентиров ИТ — от модели «вычислений как функций» к парадигме «вычислений как взаимодействий» [1, 9].

Практическая значимость внедрения MCP заключается в эффективном решении проблемы взрывной сложности интеграций. Использование универсального интерфейса позволяет свести задачу сопряжения моделей с инструментами из экспоненциальной зависимости в линейную. Это

обеспечивает ИИ-ассистентам стандартизированный и безопасный доступ к глобальной инфраструктуре данных, включая локальные файловые системы, корпоративные базы данных и облачные API. Способность агентов одновременно использовать контекст нескольких специализированных серверов позволяет сокращать время выполнения комплексных задач. В долгосрочной перспективе развитие MCP будет способствовать выходу агентов за пределы закрытых платформ и формированию полноценной «Сети Агентов» (Web of Agents). В этой связной экосистеме интеллектуальные посредники смогут автономно обнаруживать нужные сервисы и объединяться в группы для продуктивного сотрудничества в интересах пользователя [3, 8, 9].

Тем не менее, широкое распространение данной технологии требует опережающего развития механизмов безопасности и внедрения строгих паттернов верификации действий. Дальнейшие исследования в этой области должны быть сосредоточены на автоматизации контроля когнитивных циклов агентов для обеспечения надежности и прозрачности их функционирования в открытых сетецентрических средах [4, 6, 11].

Список литературы:

1. Гулай, А. В. Адаптивное управление многоагентной интеллектуальной системой: алгоритмический аспект / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Наука и техника. – 2025. – Т. 24, № 3. – С. 167-180. – DOI 10.21122/2227-1031-2025-24-3-167-180. – EDN XYSVEH.
2. Имитационная модель нейрокогнитивной системы управления автономным программным агентом, выполняющим кооперативное поведение с целью автоматического пополнения онтологий / З. В. Нагоев, И. А. Пшенокова, О. В. Нагоева [и др.] // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2023. – № 6(116). – С. 226-234. – DOI 10.35330/1991-6639-2023-6-116-226-234. – EDN RNODMY.
3. Макаренко, С. И. Основные положения концепции семантической интероперабельности сетецентрических систем / С. И. Макаренко, О. С. Соловьева // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 4. – DOI 10.30898/1684-1719.2021.4.10. – EDN DHKPVS.
4. Макаренко, С. И. Семантическая интероперабельность взаимодействия элементов в сетецентрических системах / С. И. Макаренко, О. С. Соловьева // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 6. – DOI 10.30898/1684-1719.2021.6.3. – EDN FUZTJY.
5. Мультиагентная нейрокогнитивная модель системы управления согласованным поведением коллектива автономных агентов / И. А. Пшенокова, С. А. Канкулов, Б. А. Аталиков, А. З. Энес // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2024. – Т. 26, № 5. – С. 138-146. – DOI 10.35330/1991-6639-2024-26-5-138-146. – EDN NPWOQP.
6. Нагоев, З. В. Нейрокогнитивные отображения и функции для моделей нейроморфогенеза в системах управления интеллектуальных онтофилогенетических агентов / З. В. Нагоев // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2024. – Т. 26, № 6. – С. 188-196. – DOI 10.35330/1991-6639-2024-26-6-188-196. – EDN WQHLUG.
7. Намиот, Д. Е. Архитектура LLM-агентов / Д. Е. Намиот, Е. А. Ильюшин // International Journal of Open Information Technologies. – 2025. – Т. 13, № 1. – С. 67-74. – EDN VIMKYB.
8. Принев, М. А. Многоагентные системы: обзор современных подходов к моделированию и проектированию (Часть 2) / М. А. Принев, Т. М. Леденева, В. В. Гаршина

// Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2024. – № 4. – С. 167-190. – DOI 10.17308/sait/1995-5499/2024/4/167-190. – EDN KJBPCG.

9. From Semantic Web and MAS to Agentic AI: A Unified Narrative of the Web of Agents / T. Petrova, B. Bliznioukov, A. Puzikov, R. State. Luxembourg: University of Luxembourg, 2025. 30 p. URL: https://orbilu.uni.lu/bitstream/10993/65431/1/_2507.10644v2%20%281%29.pdf (дата обращения: 29.04.2026).

10. Model Context Protocol. Architecture overview / Anthropic // Model Context Protocol: электрон. ресурс. 2025. URL: https://modelcontextprotocol.io/docs/learn/architecture (дата обращения: 02.03.2026).

11. Model Context Protocol Threat Modeling and Analyzing Vulnerabilities to Prompt Injection with Tool Poisoning / C. Huang, X. Huang, N. P. Tran, A. M. Fard // arXiv:2603.22489 [cs.CR]: электрон. препринт. 2026. URL: https://arxiv.org/pdf/2603.22489 (дата обращения: 29.04.2026).

12. Model Context Protocol. Understanding MCP servers / Anthropic // Model Context Protocol: электрон. ресурс. 2025. URL: https://modelcontextprotocol.io/docs/learn/server-concepts (дата обращения: 02.03.2026).

13. Pooja, Dr Manish Varshney. The Study of Fundamental Concepts of Agent and Multi-agent Systems / Pooja, Dr Manish Varshney // Tuijin Jishu. – 2023. – Vol. 44, No. 3. – P. 3237-3238. – DOI 10.52783/tjjpt.v44.i3.1592. – EDN MSETEK.

УДК 66.074.31

Литвяков И. С., Силко Я. Е.
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ ВИХРЕВОГО ОСУШИТЕЛЯ В СИСТЕМУ ПОДГОТОВКИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА

Аннотация: в данной работе рассматривается способ повышения эффективности осушки попутного нефтяного газа с применением вихревого сепаратора аксиального типа. Предлагается технологическое решение по внедрению вихревого аппарата с лопаточным завихрителем в схему отечественной газокомпрессорной станции для глубокой осушки ПНГ перед подачей в магистральный газопровод.

В результате реализации предлагаемого решения обеспечивается возврат в производственный процесс 2 537,3 т/год ценных тяжёлых углеводородов фракции C_{6+}, которые ранее безвозвратно уносились с газовым потоком. Одновременно достигается глубокая осушка газа: влагосодержание снижается практически в 500 раз — с 53,85 до 0,11 кг/ч, что обеспечивает удаление 429,92 т воды в год.

В работе выполнено моделирование вихревого сепаратора в программном комплексе ANSYS CFX, проведён расчёт материального баланса процесса, определена экономическая целесообразность внедрения установки. Результаты расчётов показали, что проект обеспечит годовой экономический эффект на уровне 34,58 млн руб., чистый годовой эффект составит 17,40 млн руб. при сроке окупаемости менее 5 лет (4 года 6 месяцев). Чистый дисконтированный доход за 10 лет при ставке дисконтирования 23% составит 20,24 млн руб., что подтверждает высокую инвестиционную привлекательность проекта.

Ключевые слова: попутный нефтяной газ, осушка газа, вихревой сепаратор, лопаточный завихритель, численное моделирование.

1. Введение

Россия, разрабатывающая свыше 1200 нефтяных и газоконденсатных месторождений, остаётся одним из мировых лидеров нефтедобычи [1]. Важным сопутствующим продуктом является попутный нефтяной газ (ПНГ), отличающийся высоким содержанием ценных тяжёлых углеводородов (C_{3+}), но также содержащий влагу и агрессивные примеси (H_2S, CO_2) [2]. Рациональная утилизация ПНГ имеет стратегическое значение для развития отечественной энергетики и нефтехимии.

Попутный нефтяной газ содержит водяные пары, которые приводят к многочисленным проблемам при его транспортировке и эксплуатации. Осушка газа является критически важным этапом подготовки к подаче в магистральные трубопроводы и нефтегазопромышленные объекты, что делает проект особенно актуальным для российской отрасли [3].

Удаление влаги из газа напрямую связано с возвратом ценных углеводородов. В процессе осушки вместе с водой конденсируются и

выделяются тяжелые фракции, которые после отделения направляются на переработку, увеличивая маржинальность добычи. Это позволяет не только стабилизировать состав газа, но и вернуть в производственный цикл ценное сырьё для нефтехимии.

Содержание воды в газе способствует образованию конденсата и эмульсий внутри трубопроводов и технологических узлов. Это создаёт благоприятные условия для коррозии и ускоренного износа оборудования, что ведёт к увеличению капитальных и эксплуатационных затрат на ремонт, а также повышает риск аварийных ситуаций. Одновременно осушка позволяет увеличить теплотворную способность газа, что повышает эффективность его транспортировки на большие расстояния. При низких температурах и высоких давлениях в магистральных газопроводах остаточная влага может приводить к образованию гидратов, которые способны полностью блокировать поток. Глубокая осушка газа минимизирует вероятность гидратообразования и обеспечивает стабильную работу.

Задача создания современных и эффективных систем осушки газа, сопряженных с извлечением углеводородов, приобретает стратегическое значение для всей отрасли. Внедрение таких решений позволяет минимизировать технологические риски, снизить эксплуатационные издержки, обеспечить высокое качество поставляемого газа и получить дополнительный доход от реализации извлеченных компонентов, что особенно актуально для масштабной сырьевой базы России и её крупнейших нефтегазовых компаний.

2. Результаты исследования

Несмотря на технологические сложности, в России наблюдается устойчивый рост полезного использования ПНГ: уровень утилизации увеличился с 76 % (2010 г.) до 83 % (2020 г.) [4]. Стимулом для дальнейшего повышения эффективности служит постановление Правительства РФ № 710 от 22.01.2025, устанавливающее целевой показатель 95 % и предусматривающее штрафные санкции за его недостижение [5]. В 2022 г. совокупная добыча природного и попутного газа достигла 673,8 млрд м³, из которых 99,8 млрд м³ составил ПНГ (без учёта сожжённого) [6]. Эти данные подтверждают актуальность внедрения ресурсосберегающих технологий подготовки газа. Достижение нормативных показателей утилизации требует комплексного подхода, включающего модернизацию инфраструктуры и применение нового оборудования.

Эффективное развитие ресурсных регионов России непосредственно связано с вопросами повышения уровня квалифицированного использования ПНГ и доведения этого показателя до 95 % по всем нефтегазовым компаниям. Эта государственная программа осуществима при разработке комплексной системы мер стимулирования нефтегазовых компаний, в первую очередь, в применении новых технологий и нового оборудования для переработки ПНГ, а также выполнения требований лицензионных соглашений.

Мировые подходы к утилизации ПНГ схожи, однако их практическое применение варьируется. Наиболее рациональным направлением остаётся переработка: попутный газ разделяют на лёгкие и тяжёлые фракции. Лёгкие компоненты направляются в магистральные трубопроводы, что технологически оправдано лишь при близости месторождений к газотранспортным системам с достаточной резервной пропускной способностью. Тяжёлые фракции поступают на газоперерабатывающие и нефтехимические комплексы для последующего выделения пропана, бутана, пентан-гексановой фракции и других целевых продуктов [7].

Закачка ПНГ в пласт для поддержания давления и повышения нефтеотдачи ограничена техническими, нормативными и экономическими факторами, поскольку объём добываемого газа, как правило, превышает возможности его повторного нагнетания [8]. Более универсальным решением является сжигание ПНГ в циклонных реакторах с рекуперацией тепла для подогрева нефти, пластовой воды или генерации энергии. Данный подход особенно эффективен для удалённых и малодебитных месторождений: он позволяет избежать штрафов за факельное сжигание, снизить энергозатраты на подготовку продукции и рационально использовать попутный газ как локальный энергоресурс.

Переработка ПНГ является частью глобальной экологической повестки, закреплённой в инициативе «Zero Routine Flaring by 2030», принятой на конференции COP21 в Париже (2015) и предусматривающей полный отказ от факельного сжигания попутного газа к 2030 году [9].

Традиционное факельное сжигание ПНГ наносит существенный экологический ущерб, а применение сорбционных и низкотемпературных методов осушки часто экономически нецелесообразно из-за высокой капиталоёмкости, превышающей стоимость самого газа. При этом полное исключение факельного сжигания невозможно, поскольку оно сохраняется как необходимый элемент системы промышленной безопасности при нештатных изменениях давления [8].

Одной из приоритетных задач современной экономики является оптимизация затрат энергетических и материальных ресурсов для повышения общей эффективности.

Практическое применение получили вихревые камеры для осушки воздуха и газов. Механически полученный закрученный поток не требует дополнительных затрат на реагенты, не имеет движущихся частей [10-13].

Их ключевое преимущество — механическое формирование закрученного потока без применения химических реагентов и движущихся элементов [10–13]. Конструктивно аппарат представляет собой цилиндрическую камеру с тангенциальным входным соплом и диафрагмой на выходе. При подаче влажного газа под избыточным давлением возникает интенсивное вихревое течение: под действием центробежных сил жидкая фаза

оттесняется к стенкам, образуя плёнку, тогда как осушенный газовый поток перемещается в осевой зоне [13].

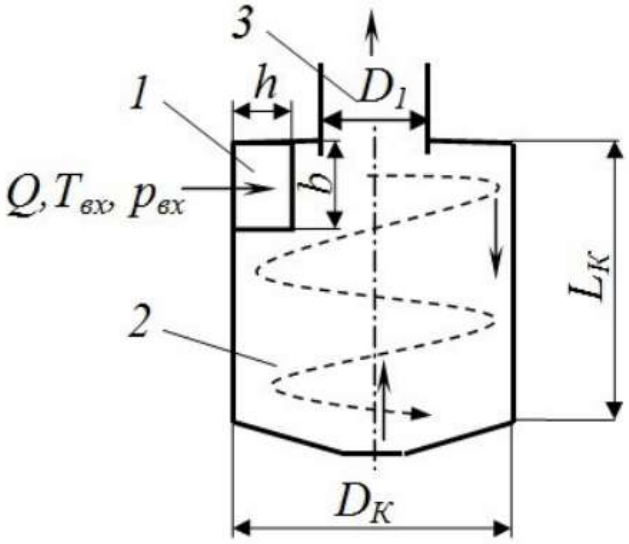


Рисунок 1. Схема вихревой камеры

При подаче через тангенциальное сопло газожидкостная смесь закручивается и, под действием центробежных сил влага, оттесняется к стенкам камеры, образуя плёнку, что существенно снижает влагосодержание осевого потока. В аппарате формируются два встречных потока — нагретый периферийный и охлаждённый осевой (эффект Ранка–Хилша) [20], при этом радиальный температурный градиент стимулирует конденсацию влаги в ядре потока и испарение плёнки у стенок. Мелкодисперсные капли, не успевшие отделиться, уносятся через диафрагму с осушенным газом, тогда как основная масса влаги задерживается в аппарате; эффективность сепарации определяется преимущественно центробежными силами и зависит от режимных параметров потока (расход, давление, температура, влажность) и геометрических характеристик устройства [14] .

Моделирование в ANSYS позволяет одновременно рассчитать сложную гидро- и аэродинамику потока и процессы теплообмена, которые необходимы для конденсации влаги. Программное обеспечение позволит наглядно увидеть распределение скоростей и температур внутри вихревой трубы, что практически невозможно сделать с помощью обычных датчиков на реальном стенде. Программа дает возможность быстро менять размеры и форму устройства, чтобы найти оптимальную конструкцию без затрат на изготовление металлических прототипов. Также инструменты моделирования позволяют отследить траектории капель воды и точно оценить, насколько эффективно они отделяются от газа. Такой виртуальный эксперимент значительно упрощает работу инженера, помогая заранее предсказать качество осушки при любых рабочих давлениях [15].

В ходе исследования работы отечественной газокомпрессорной станции было установлено, что газ, подаваемый по трубопроводу на газоперерабатывающий завод, не проходит достаточную степень осушки. В качестве решения предлагается внедрение вихревого устройства. Данный подход позволит обеспечить более глубокую осушку газа и, как следствие, повысить общую энергоэффективность технологического процесса [16].

Расчёт в Ansys CFX выполняется на основе численного решения системы уравнений в частных производных, описывающих сохраняемые величины: массу, импульс, энергию, концентрацию компонентов [17].

Сепараторы с завихрителем представляют собой широкий класс аппаратов для разделения многофазных потоков, в которых центробежная сила, создаваемая закрученным потоком, используется для интенсификации процесса сепарации (таблица 1) [18].

Таблица 1. Классификация сепараторов с завихрителем по типу подвода потока

Тип завихрителя	**Конструктивное исполнение**	**Преимущества**	**Недостатки**	**Области применения**
Тангенциальный ввод	Поток подаётся по касательной к цилиндрическому корпусу	Простота конструкции, надёжность, отработанная технология, низкая стоимость	Эрозия корпуса в зоне входа из-за прямого удара потока с абразивом, большие габариты	Циклонные пылеуловители, сепараторы сжатого воздуха, гидроциклоны
Аксиальный завихритель (лопаточный)	Поток проходит через систему направляющих лопаток	Компактность, низкое гидравлическое сопротивление, возможность регулировки угла закрутки	Требовательность к качеству сборки, изготовления	Газожидкостные сепараторы, авиационные и энергетические системы.
Спиральный/ Винтовой завихритель	Винтовая нарезка или спиральные каналы внутри корпуса	Плавное закручивание, снижение турбулентности	Сложность и высокая стоимость изготовления.	Тонкая очистка газов, разделение эмульсий
Комбинированный	Сочетание тангенциального подвода и аксиальных лопаток	Гибкая настройка вихревой структуры	Максимальная сложность и стоимость, Сложность балансировки	Специальные промышленные сепараторы

Тип завихрителя	Конструктивное исполнение	Преимущества	Недостатки	Области применения
			потоков между ступенями	

Выбор аксиального сепаратора с лопаточным завихрителем для подготовки попутного нефтяного газа обусловлен необходимостью обеспечения высокой эффективности капельного улавливания (до 99% для капель> 10 мкм) при минимальных энергозатратах на преодоление гидравлического сопротивления. В отличие от тангенциальных циклонов, аксиальная конструкция обеспечивает повышенную стойкость к эрозионному износу песком, характерным для скважинной продукции [12,13]. Кроме того, симметричная геометрия аппарата позволяет повысить точность численного моделирования в среде Ansys CFX за счёт использования структурированных сеток и корректного разрешения пограничного слоя на лопатках завихрителя [19].

Для решения поставленной задачи необходимо начинать с построения геометрической модели.

На рисунке 2 представлена расчетная сетка модели.

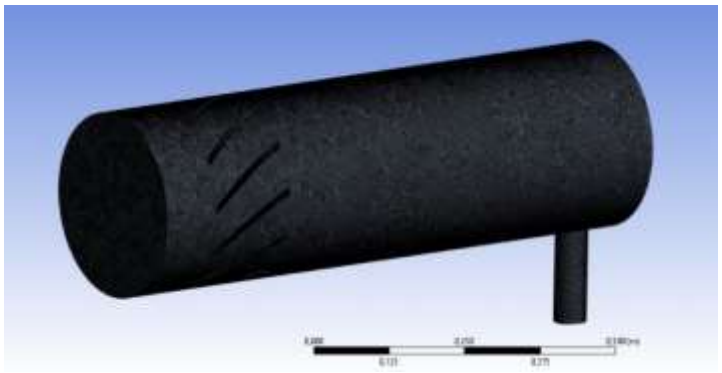


Рисунок 2. Расчетная сетка модели

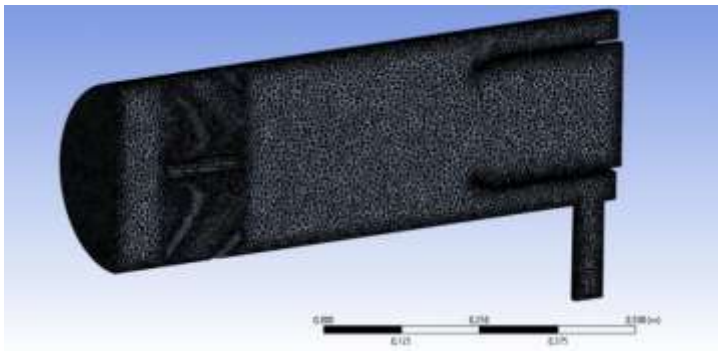


Рисунок 3. Расчетная сетка модели в разрезе

Далее были заданы условия и состав поступающего попутного нефтяного газа. Заданные параметры потока газоводонефтяной эмульсии представлены в таблице 2.

Таблица 2. Состав потока

Компонент	**Объемная доля, %**
Метан	60,88
Этан	7,6
Пропан	17,35
Бутаны	8,49
Пентаны	1,87
Азот	1,33
Углекислый газ	0,03
Вода	1,5
УВ C_{6+}	0,95

Основные параметры потока представлены в таблице 3.

Таблица 3. Основные параметры

Параметр	**Значение**
Температура, ℃	20
Давление, кгс/см^2	5
Мр, г/моль	27,50
Вязкость, мкПа·с	0,01047
Плотность кг/м^3	6,917
Теплоемкость кДж/кг*К	1,92

На следующем этапе запускается расчет и просматриваются результаты моделирования.

На рисунке 4 представлена трёхмерная модель входного узла осушителя, демонстрирующая геометрию лопаточного аппарата, формирующего закрученный осевой-вращательный поток газа на всём протяжении рабочей зоны.

Рисунок 4. Трёхмерная модель вихревого аппарата осушки газа

Внутри цилиндрического корпуса установлены лопасти. Проходя через них поток газа закручивается, тяжелые капли нефти прижимаются к стенкам и уходят в нижний штуцер, не долетая до выхода. Полая конструкция в центре – ловушка - пропускает только легкую газовую фазу, защищая процесс от попадания влаги (рисунок 5).

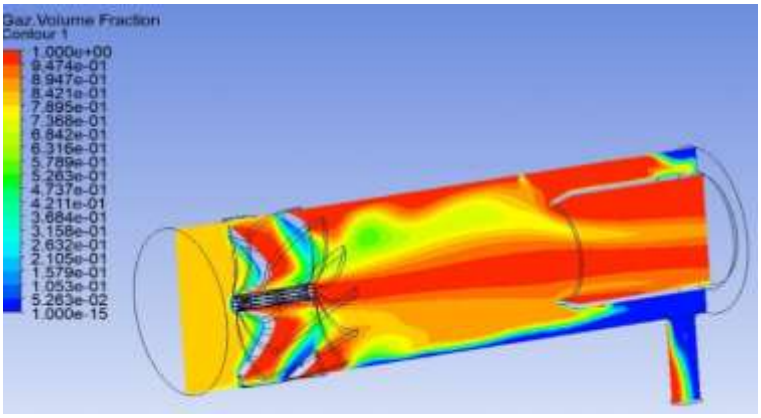


Рисунок 5. Распределение объёмной доли газовой фазы

Представленный на рисунке 6 расчет демонстрирует распределение объемной доли нефтяной эмульсии при прохождении через устройство.

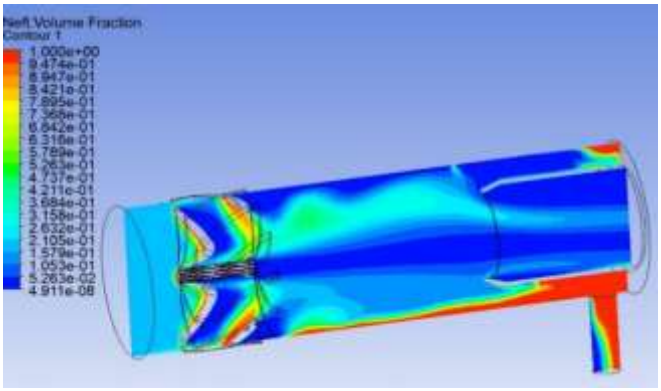


Рисунок 6. Распределение объемной доли нефтяной эмульсии

Комплексный анализ показывает, что исследуемая модель сепаратора обеспечивает требуемые условия для эффективного фазового разделения. Сделанный вывод подтверждает правильность выбранной конструкции закручивающего устройства и оптимальность режимных параметров (скорость, расход, геометрия каналов) для достижения требуемой степени разделения фаз.

Для количественной оценки эффективности предлагаемого решения приведен материальный баланс сепаратора (таблица 4), отражающий изменение состава газа, отправляющегося на газоперерабатывающий завод. Ключевыми изменениями является возврат 528,6 кг/ч тяжёлых углеводородов (C_{6+}) в процесс, а также снижение влагосодержания почти в 500 раз — с 53,85 до 0,11 кг/ч. Таким образом, предлагаемое технологическое решение обеспечивает не только

максимальное извлечение ценных компонентов, но и более эффективное удаление воды.

Таблица 4. Материальный баланс сепаратора

Приход				**Расход**			
Компонент	кг/ч	т/год	% масс.	Компонент	кг/ч	т/год	% масс.
1 ПНГ, в т.ч.	17422,24	139377,9		1 ПНГ, в т.ч.	16839,9	134719,2	
– Метан	6239,57	49916,56	35,814	– Метан	6239,57	49916,56	35,814
– Этан	1459,42	11675,36	8,377	– Этан	1459,42	11675,36	8,377
– Пропан	4886,79	39094,32	28,049	– Пропан	4886,79	39094,32	28,049
– Бутаны	3147,55	25180,4	18,066	– Бутаны	3147,55	25180,4	18,066
– Пентаны	860,88	6887,04	4,941	– Пентаны	860,88	6887,04	4,941
– Азот	237,15	1897,2	1,361	– Азот	237,15	1897,2	1,361
– Углекислый газ	8,43	67,44	0,048	– Углекислый газ	8,43	67,44	0,048
– Вода	53,85	430,8	0,309	– Вода	0,11	0,88	0,001
– УВ C_{6+}	528,6	4228,8	3,034	2 Вода	53,74	429,92	0,308
				3 УВ С6+	528,6	4228,8	3,034
Итого:	17422,24	139377,9	100	Итого:	17422,24	139377,9	100

Для комплексной оценки экономической эффективности проекта внедрения вихревого сепаратора в систему осушки попутного нефтяного газа (ПНГ) выполнен расчёт ключевых финансово-экономических показателей на горизонте планирования 10 лет.

Ранее 528,6 кг/ч УВ (C_{6+}) уносились с газом и реализовывалось по цене газа. После внедрения вихревой сепарации они возвращаются в процесс и продаются как нефть.

Приведённый в таблице 4 материальный баланс отражает теоретический потенциал сепарации при идеальных условиях, тогда как в технико-экономическом расчёте использован реалистичный коэффициент извлечения 0,6, учитывающий гидродинамические потери, неидеальность фазового разделения и эксплуатационные режимы работы оборудования

ПНГ имеет более высокую теплоту сгорания по сравнению с магистральным природным газом за счёт повышенного содержания пропана, бутанов и тяжёлых углеводородов.

Эквивалент в ПНГ (35 МДж/м³): 45/35 = 1,29 м³/кг

Энергетическая эквивалентность рассчитывается как отношение массовой теплоты сгорания УВ С6+ к объёмной теплоте сгорания ПНГ:

$$K_{\text{экв}} = \frac{Q_{\text{масса}}^{\text{C6+}}}{Q_{\text{объём}}^{\text{ПНГ}}} = \frac{45\ \text{МДж/кг}}{35\ \text{МДж/м}^3} = 1{,}29\ \text{м}^3/\text{кг}\ (1)$$

Физический смысл: 1 кг тяжёлых углеводородов (C_{6+}) содержит столько же энергии, сколько 1,29 м³ попутного нефтяного газа.

Расчет:

Шаг 1. Годовой объём возвращаемой нефти (с коэффициентом извлечения):

$$528{,}6\ \text{кг/ч} \times 8000\ \text{ч/год} \times 0{,}6 = 2537{,}3\ \text{т/год} = 2537300\ \text{кг/год}\ (2)$$

Шаг 2. Энергетический эквивалент в объёме газа:

$$2537300\ \text{кг} \times 1{,}29\ \text{м}^3/\text{кг} = 3273117\ \text{м}^3/\text{год} \approx 3{,}27\ \text{млн м}^3/\text{год}\ (3)$$

Шаг 3. Доход, если бы УВ С6+ продавались как газ (альтернативная стоимость):

$$3{,}27\ \text{млн м}^3 \times 4{,}55\ \text{руб/м}^3 = 14{,}89\ \text{млн руб/год}\ (4)$$

Шаг 4. Доход от продажи как нефти (текущий сценарий):

$$2537{,}3\ \text{т} \times 19500\ \text{руб/т} = 49{,}48\ \text{млн руб/год}\ (5)$$

Шаг 5. Дополнительный чистый доход (эффект от изменения формы реализации):

$$49{,}48 - 14{,}89 = 34{,}58\ \text{млн руб/год}\ (6)$$

Согласно календарному плану реализации проекта, продолжительность монтажно-пусконаладочных работ по интеграции вихревого сепаратора в технологическую схему осушки ПНГ составляет 2 месяца. В рамках расчётной модели принято допущение о вводе оборудования в промышленную эксплуатацию в середине первого года расчётного периода (июль), что обусловливает пропорциональное сокращение периода генерации операционных денежных потоков в первом году. Следовательно, выручка от реализации дополнительной продукции в первый год эксплуатации определяется с применением коэффициента временной пропорциональности k_1 =0,5 к годовой расчётной величине:

$$R_1 = k_1 \cdot R_{\text{год}} = 0{,}5 \cdot 34{,}58 = 17{,}29\ \text{млн руб}\ (7)$$

Далее выручка будет составлять $R_{2\ldots10}$ = 34,58 млн руб/год

Учитывая полугодичный период эксплуатации в первом году расчётного горизонта, операционные затраты масштабируются пропорционально доле календарного времени функционирования установки:

$$OPEX_1 = k_1 \cdot OPEX_{\text{год}} = 0{,}5 \cdot 13{,}00 = 6{,}5\ \text{млн руб}\ (8)$$

Норма амортизации принята 10%. Годовая сумма амортизационных отчислений определяется по формуле линейного метода:

$$A_t = CAPEX \cdot k_{\text{ам}},\ (9)$$

где A_t— годовая сумма амортизации, млн руб.;

CAPEX— первоначальная стоимость основных фондов (капитальные вложения), млн руб.;

$k_{\text{ам}}$— норма амортизации, выраженная в долях единицы (10%).

Расчётное значение:

А=48,3·0,1 = 4,83 млн. руб.

Итоговая таблица с рассчитанными показателями представлена в таблице 5.

Таблица 5. Итоговая сводная таблица показателей

Показатель	**Значение**
Технические параметры	
Массовый расход ПНГ	16 839,9 кг/ч
Объёмный расход ПНГ	9 355,5 м³/ч
Плотность ПНГ	1,8 кг/м³
Годовой объём ПНГ	74,84 млн м³/год
Удалено воды	429,92 т/год
Возврат нефти (УВ С6+)	2 537,3 т/год (коэфф. извлечения 0,6)
Ценовые параметры	
Цена газа	4,55 руб/м³
Цена нефти ($45/баррель, 70 руб/$)	19 500 руб/т
Экономические показатели	
Капитальные затраты (CAPEX)	48,3 млн руб
В том числе оборудование	17,0 млн руб
В том числе монтаж и работы	25,0 млн руб
Резерв (15%)	6,3 млн руб
Операционные расходы (OPEX)	13,0 млн руб/год
Чистый годовой эффект	17,40 млн руб/год
Эффективность	
Срок окупаемости (базовый)	2 год 9 месяцев
Дисконтированный срок окупаемости	4 года 6 месяцев
ЧДД за 10 лет (при ставке 23%)	20,2 млн руб
ВНД	~43%
ИДД	1,4
Ставка налога на прибыль	0,25

3. Заключение

Проект внедрения вихревой осушки ПНГ демонстрирует высокую экономическую эффективность: срок окупаемости составляет менее 5 лет при чистом годовом эффекте 17,40 млн рублей. Даже при повышенной ставке дисконтирования 23% проект генерирует положительный чистый дисконтированный доход 20,2 млн рублей за 10 лет, а внутренняя норма доходности достигает 43%, что почти в два раза превышает требуемую инвесторами доходность.

Список литературы:

1. Громов А. Ю. Исследование процесса переработки попутного нефтяного газа [Электронный ресурс] / А. Ю. Громов, И. Н. Новиков, М. А. Федорова // Проблемы науки. — 2019. — № 12. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protsessa-pererabotki-poputnogo-neftyanogo-gaza (дата обращения: 20.02.2026). — Текст : электронный.

2. Комплексный анализ способов газоподготовки [Электронный ресурс]// Нефтегазовое дело. URL: https://magazine.neftegaz.ru/articles/pererabotka/798583-kompleksnyy-analiz-sposobov-gazopodgotovki/ (дата обращения 30.05.2025)

3. Филиппов А. Попутный нефтяной газ нужен России [Электронный ресурс] / А. Филиппов // Neftegaz.RU. – 2013. – № 5. – URL: https://magazine.neftegaz.ru/articles/aktualno/602877-poputnyy-neftyanoy-gaz-nuzhen-rossii/ (дата обращения: 26.02.2026). – Текст : электронный

4. Основные показатели газовой отрасли [Электронный ресурс]// Официальный сайт Министерства энергетики РФ. – URL: https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/1920/69055 (дата обращения: 30.11.2024 г.)

5. Эдер Л. Газовая отрасль России: достижения и перспективы [Электронный ресурс] / Л. Эдер, И. Филимонова, В. Немов, А. Комарова, С. Шумилова // Нефтегазовая вертикаль. Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН. – 2020. – URL: http://www.ngv.ru/upload/iblock/9ba/9bac65588895ab30a462661d657f76ae.pdf (дата обращения: 30.11.2024 г.)

6. Проект энергетической стратегии России на период до 2035 года [Электронный ресурс] // Официальный сайт Министерства энергетики РФ. – URL: https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/1920/69055 (дата обращения: 30.11.2024 г.)

7. Конторович А.Э., Эдер Л.В. Новая парадигма стратегии развития сырьевой базы нефтедобывающей промышленности Российской Федерации // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2015. – № 5. С. 8-17/

8. Картамышева, Е. С. Попутный нефтяной газ и проблема его утилизации / Е. С. Картамышева, Д. С. Иванченко. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 25 (159). С. 120-124. — URL: https://moluch.ru/archive/159/44871/ (дата обращения: 03.06.2025)

9. Zero Routine Flaring by 2030 [Электронный ресурс] // The World Bank. — May 10, 2017. — URL: http://www.worldbank.org/en/programs/zero-routine-flaring-by-2030 (дата обращения: 03.06.2025)

10. Переработка природного и попутного газа: Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям // Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии – М: Бюро НДТ. – 2017. 222 с.

11. Надеев А. А., Бараков А. В., Дубанин В. Ю. Экспериментальное исследование процесса сушки сили¬кагеля в аппарате с центробежным псевдоожиженным слоем // Вестник Воронежского государственного техни-ческого университета. 2018. Т. 14, № 2. С. 44–50.

12. Яковлев А. Б. Разработка вихревых аппаратов осушки сжатого воздуха для систем наземного стартового комплекса // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 2. С. 111–116.

13. Суслов А. Д., Иванов С. В., Мурашкин А. В. Вихревые аппараты – М.: Машиностроение, 1985. 256 с.

14. Жидков Д.А. Разработка и исследование высокорасходных трехпоточных вихревых труб с целью повышения эффективности низкотемпературной очистки углеводородных газов: дис. канд. наук :05.04.03 / Жидков Дмитрий Алесеевич. – М., 2020. 157 с.

15. Федорова, Н.Н. Основы работы в ANSYS / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – Мосвка: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.

16. Технологический регламент АО «Оренбургнефть». Эксплуатация бобровской газокомпрессорной станци. Версия 1. – г. Бузулук – 2023. – 73 с.

17. ANSYS для инженеров : Справ. пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. - Москва : Машиностроение : Машиностроение-1, 2004. - 511 с. : ил.; 22 см.; ISBN 5-94275-048-3

18. Сепараторы циклонного типа [Электронный ресурс] // Compressor-prom.ru. — URL: https://compressor-prom.ru/podgotovka-szhatogo-vozduxa/separatory-ciklonnogo-tipa (дата обращения: 02.03.2026).

19. ANSYS Student. Free Student Software [Электронный ресурс] // ANSYS Продукты. – URL: https://www.ansys.com/academic/free-student-products (дата обращения 05.10.2025).

УДК 625

Миленьких В. А., Иванов А. А., Михайлова И. А.
Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация: в статье рассматривается концепция цифровых двойников и их применение в строительстве железных дорог. Актуальность темы обоснована необходимостью повышения эффективности проектных и строительных операций, улучшения мониторинга, и управления жизненным циклом инфраструктуры. Особое внимание уделяется преимуществам, которые представляет данная технология, включая улучшение координации между участниками проекта, снижение ошибок и затрат, а также общее увеличение эффективности работы.

Ключевые слова. Цифровой двойник, BIM технологии, ТИМ технологии, строительство, железная дорога.

Введение

Железнодорожный транспорт является одним из наиболее востребованных систем не только на территории Российской Федерации, но и во всем мире. Со стремительным развитием технологий в строительной отрасли появляется все больше новых решений для повышения эффективности проектирования и строительства железных дорог. Одним из ключевых достижений технологического прогресса является концепция создания цифровых двойников, технологий информационного моделирования (BIM). В контексте строительства железных дорог данная технология позволяет не только облегчить процесс проектирования, но и обеспечить точный контроль на всех этапах начиная от обоснования инвестиций эксплуатации. Цифровые двойники представляют собой модель существующего или строящегося объекта, предназначенную для анализа и мониторинга его поведения в реальном времени. Они способствуют оптимизации ресурсов, увеличению качества строительства, а также уменьшению количества ошибок на стадии проектирования и эксплуатации. Это создаёт уникальную возможность для интеграции данных на всех этапах жизненного цикла объекта — от проектирования до эксплуатации, — что напрямую способствует повышению качества принимаемых решений в ходе разработки проекта [2,3].

Реализация BIM технологий позволяет избежать ошибок на этапах проектирования и сильно сократить время оценки стоимости объекта [1]. Применение рассматриваемых технологий обеспечивает возможность проанализировать большое количество вариантов конструктивных решений строения и расположения трассы железнодорожного пути. Это позволяет выбрать наиболее экономически эффективный и рациональную конфигурацию расположения и развития железнодорожного пути. Кроме того,

технология информационного моделирования демонстрирует наиболее выгодную конструкцию верхнего и нижнего строения пути с точки зрения дальнейшей эксплуатации.

Экономические факторы реализации технологий информационного моделирования являются одними из основных критериев для их внедрения. Ключевыми эффектами включают снижение затрат за счет сокращения ошибок в процессе проектирования, а именно сокращение количества коллизий и устранения их на ранних этапах проектирования. Также наблюдается снижение стоимости строительства объекта путем сокращения количества незапланированных изменений, модификаций проекта, и сокращения количества переделок. Улучшение данных показателей оказывает комплексное влияние на эффективность строительного процесса: наряду с уменьшением стоимости объекта обеспечивается пропорциональное сокращение продолжительности строительства [1,3,5,6].

Использование цифровых двойников при эксплуатации железнодорожного пути позволяет анализировать состояние различных элементов конструкций пути. При помощи систем датчиков, интегрируемых в информационную модель, появляется возможность наблюдать за работой системы в реальном времени, что позволяет выявлять дефекты на начальной стадии их возникновения. Благодаря этому появляется возможность продлить межремонтные сроки эксплуатации инфраструктуры, что напрямую способствует поддержанию бесперебойного и безопасного движения поездов [4]. Помимо датчиков, технологии информационного моделирования позволяют проводить сценарный анализ и прогнозировать поведение объекта до его строительства, что снижает риски возникновение отказов еще до начала строительства объекта.

Помимо вышесказанного следует выделить точность при строительстве транспортной инфраструктуры. Внедрение цифровых моделей местности, ситуации, рельефа, геологических условий и инженерных сетей на основе полученных инженерных изысканий позволит создать наглядную модель для восприятия. Это даст возможность выявить потенциальные проблемы на этапе проектирования и в итоге продемонстрирует высокую точность и минимизацию ошибок в дальнейшем при последующем строительстве объектов транспортной инфраструктуры, а также снизит затраты на рабочую силу. Вместе с этим растет и координация участников проекта, поскольку все изменения в проекте происходят в реальном времени и отображаются на общей информационной модели, что преимущество способствует более эффективному взаимодействию и уменьшает количество ошибок [5,6].

Наряду с очевидными преимуществами, технологии информационного моделирования и цифровые двойники имеют ряд недостатков и проблем внедрения, а именно: отсутствие большого количества квалифицированных специалистов в данной сфере, наличие высоких первоначальных затрат на приобретение программного обеспечения, лицензий,

высокопроизводительного оборудования для создания информационных моделей и обучение персонала.

Технические и правовые ограничения образуют один из наиболее значимых барьеров, препятствующих масштабному внедрению BIM-технологий в строительной отрасли. В технической сфере остаётся ряд нерешённых вопросов, включая управление большими объёмами данных, их долгосрочное хранение, архивацию и актуализацию на протяжении всего жизненного цикла объекта. Кроме того, сохраняются риски искажения данных о состоянии инфраструктуры и несанкционированного вмешательства в управление движением. Существенным барьером является отсутствие единых требований к данным и нерешённость проблемы интероперабельности различных информационных систем. Параллельно сохраняется правовая неопределённость, а именно, не закреплённые права собственности на цифровые информационные модели и не распределена ответственность между участниками проекта за полноту, достоверность и своевременную актуализацию содержащихся в них данных. Это создаёт риски как при интеграции систем, так и при возникновении аварийных ситуаций, связанных с недостоверной информацией [4,5].

Вывод

Цифровые двойники становятся важным инструментом в строительстве железных дорог. В железнодорожном строительстве BIM чаще всего применяется для решения проблем, связанных с тоннелями, представляя возможность для повышения эффективности, безопасности, устойчивости проекта. Данная технология позволяет создавать модели, которые отражают реальные условия и процессы, что облегчает планирование, мониторинг и управление проектом. Внедрение методик информационного моделирования в практику проектирования и строительства объектов транспортной инфраструктуры открывает широкие возможности для комплексной оптимизации ресурсного обеспечения на всех этапах реализации проекта. За счёт создания единой информационной среды, аккумулирующей данные о геометрических, физических и эксплуатационных характеристиках объекта, достигается существенное повышение эффективности использования материальных, трудовых и финансовых ресурсов. Это, в свою очередь, позволяет не только сократить общие затраты на строительство, но и значительно улучшить качество выполняемых работ, минимизировав количество ошибок и необходимость последующих переделок. Кроме того, методики информационного моделирования предоставляют возможность многовариантного анализа различных сценариев функционирования объекта как на этапе проектирования, так и в ходе его последующей эксплуатации. Такой подход способствует своевременному выявлению потенциальных рисков и разработке мер по их предотвращению, что в конечном счёте повышает надёжность и безопасность эксплуатации инфраструктурных объектов. Таким образом, грамотный, методологически выверенный подход к

внедрению технологий информационного моделирования и созданию цифровых двойников позволяет не только значительно улучшить качественные и скоростные показатели строительства, но и заложить основу для эффективного управления жизненным циклом объектов. В перспективе это открывает новые возможности для устойчивого и динамичного развития транспортной инфраструктуры, повышения её конкурентоспособности и адаптации к современным вызовам.

Список литературы:

1. Das K., Khursheed S., Paul V.K. The impact of BIM on project time and cost: insights from case studies // Discover Materials. – 2025. – Vol. 5, No. 25. – P. 1–19
2. Грузд Д.Е. Цифровые двойники на железнодорожном транспорте //[Вопросы права №2]. – [2024]. – С. [1–2]. – Режим доступа: [https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki-na-zheleznodorozhnom-transporte/viewer]
3. Ашихмин А.В. Управление инженерными рисками на всех этапах жизненного цикла объекта // Международный научный журнал «Вестник науки». – 2025. – № 7 (88), Том 4. – С. [35-46]. – Режим доступа: [https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-inzhenernymi-riskami-na-vseh-etapah-zhiznennogo-tsikla-obekta/viewer]
4. Зуев Д.В. Развитие интеллектуальных транспортных систем: цифровые двойники в железнодорожной отрасли // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 4 (44). С. 33–46. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-33-46.
5. Doume-Ekale M., Poirier E. The Use of BIM in Railway Projects // Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference 2023, Volume 3. – Cham : Springer, 2024. – P. 247–259. – DOI: 10.1007/978-3-031-62170-3_18.
6. Shin M.-H., Kim H.-Y., Liao J.-F. Performance Measurement and Analysis of Building Information Modeling (BIM) Applications in the Railway Infrastructure Construction Phase // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 2. P. 502.

УДК 621.391:681.7.068

Калачёв Д. А.
Уральский технический институт связи и информатики (филиал) Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Екатеринбург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ КОДОВ RZ И NRZ В СОВРЕМЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

Аннотация: в работе рассматривается влияние дисперсии, нелинейных искажений, полосы пропускания, скорости передачи данных, длины линии, типа оптического волокна на коэффициент битовых ошибок в системах связи с линейными форматами RZ (Return-to-Zero) и NRZ (Non-Return-to-Zero). Оценкой исследования этих влияний является Q-фактор, коэффициент битовых ошибок и глаз-диаграммы при разных форматах модуляции. Проведён сравнительный анализ результатов моделирования и сформулированы рекомендации по выбору линейного кода при проектировании современных ВОСП в зависимости от длины линии и требований к полосе пропускания.

Ключевые слова: волоконно-оптическая система передачи, линейный коды RZ и NRZ, полоса пропускания, дисперсия, нелинейные искажения, Q-фактор, коэффициент битовых ошибок.

Введение

Передача информации по волоконно-оптическим системам связи лежит в основе современных магистральных, зоновых и городских сетей, где рост IP-трафика, облачных сервисов и потокового видео требует перехода от единиц к десяткам и сотням Гбит/с на один оптический канал. В этих условиях проектировщик ВОСП должен одновременно обеспечивать высокую спектральную и энергетическую эффективность, а также помехоустойчивость при ограничениях по стоимости и сложности аппаратуры. Одним из ключевых факторов, влияющих на качество передачи, является выбор формата линейного кодирования, определяющего временную форму оптических импульсов и, как следствие, спектр сигнала, чувствительность к дисперсии и нелинейным эффектам, межсимвольной интерференции и возможность восстановления тактовой частоты. На практике широко применяются форматы NRZ и RZ, которые остаются базовыми для анализа работы реальных линий «точка–точка» и служат основой для более сложных модификаций. [1-3]

В данной работе рассматривается влияние дисперсии, нелинейных искажений, полосы пропускания тракта, скорости передачи данных, длины линии и типа оптического волокна на коэффициент битовых ошибок в системах связи с линейными форматами RZ (Return-to-Zero) и NRZ (Non-Return-to-Zero). Для количественной оценки этих влияний используются Q-фактор, коэффициент битовых ошибок и глаз-диаграммы, получаемые при

разных форматах линейного кодирования. На основе результатов моделирования проводится сравнительный анализ работы систем с кодами RZ и NRZ и формулируются практические рекомендации по выбору линейного кода при проектировании современных ВОСП в зависимости от длины линии, ограничений по полосе пропускания и требуемого качества передачи. [4-6]

Постановка эксперимента

Для количественного исследования влияния дисперсии, длины линии, скорости передачи и формата линейного кодирования (RZ/NRZ) на коэффициент битовых ошибок в современных волоконно-оптических системах передачи была построена имитационная модель в программной среде OptiSystem. В качестве основы принята стандартная одномодовая линия связи на волокне типа ITU-T G.652.D. Параметры волокна: длина участка 2,4 - 30 км, затухание порядка 0,26 дБ/км при длине волны 1550 нм, хроматическая дисперсия около 17 пс/(нм·км), групповое скоростное уширение $\beta_2 \approx -20$ пс²/км. Линия рассматривается как фрагмент магистральной ВОСП, работающей в С-диапазоне на фиксированной длине волны 1550 нм при оптической мощности передатчика 10 дбМ (10 мВт). На рисунке 1 представлена смоделированная схема.

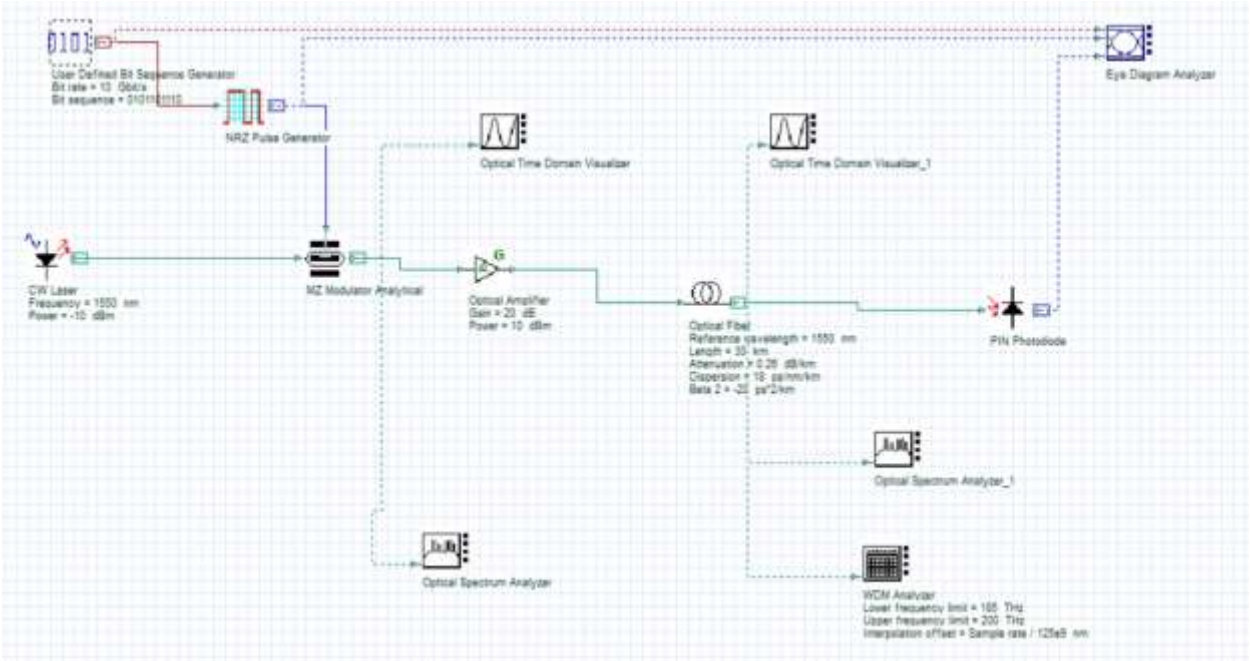


Рисунок 1 – Имитационная модель в программной среде OptiSystem

Передающая часть модели включает генератор псевдослучайной битовой последовательности со скоростью 10, 100 и 200 Гбит/с, блок линейного кодирования (альтернативно формирующий импульсы в форматах NRZ и RZ), а также внешний модулятор типа Mach–Zehnder, управляющий непрерывным лазерным излучением на длине волны 1550 нм. Для формата NRZ логическая «1» передаётся непрерывным уровнем оптической мощности в течение всего такта, логический «0» — нулевым (или близким к нулю)

уровнем. Для формата RZ логическая «1» представлена импульсом, занимающим лишь часть тактового интервала (коэффициент заполнения около 0,5), после чего сигнал возвращается к нулю до следующего бита. Линейный тракт включает одномодовое волокно G.652.D с указанными параметрами, в ряде сценариев разбитое на несколько секций (2,4 км; 5,2 км; 9 км; 11 км) для оценки вклада каждой секции в суммарное уширение импульсов. Приёмная часть состоит из оптического фильтра, фотодиода (PIN), электрического фильтра низких частот и схемы принятия решений. Для оценки качества передачи используются стандартные инструменты OptiSystem: глаз-диаграммы, минимальный коэффициент битовых ошибок (BER) и Q-фактор, рассчитываемый по статистике уровней «0» и «1» в приёмном сигнале.

Результаты моделирования

Моделирование показало, что при битовой скорости 10 Гбит/с влияние хроматической дисперсии в волокне G.652.D для отрезков малой длины (от единиц до десятков километров) сравнительно невелико: импульсы уширяются, но межсимвольная интерференция остаётся на приемлемом уровне. Это подтверждается крайне низкими значениями BER и высокими значениями Q-фактора для отдельных секций линии. Так, для короткого участка длиной 2,4 км при скорости 10 Гбит/с и мощности источника 10 дБм Q-фактор для формата NRZ достигает порядка 22,3, при этом минимальный коэффициент битовых ошибок составляет около 10^{-111}. Для того же участка и тех же условий формат RZ демонстрирует ещё более высокое качество: Q-фактор около 23,8 при минимальном коэффициенте битовых ошибок 10^{-126}, что отражает преимущество RZ-кода по запасу помехоустойчивости на малых расстояниях за счёт лучшей временной разделимости символов. Аналогичная картина наблюдается и для других коротких участков (5,2 км, 9 км, 11 км): при фиксированной скорости 10 Гбит/с и неизменных параметрах волокна формат RZ даёт немного более высокие значения Q-фактора и более низкий BER, чем NRZ. В таблице 1 представлены показатели эффективности каждого формата.

Таблица 1 – «Показатели эффективности NRZ и RZ»

Формат модуляции		**NRZ**		**RZ**	
Скорость передачи	**Длина линии**	**Показатели эффективности**		**Показатели эффективности**	
		BER	**Q-фактор**	**BER**	**Q-фактор**
10 Гбит/с	2.4 км	$7.8388596e^{-111}$	22.3204659	$3.340074e^{-126}$	23.84951215
	11 км	$14.390866e^{-039}$	12.9117180	$0.136556e^{-093}$	20.58840098
	9 км	$11.421477e^{-036}$	12.3968419	$59.83157e^{-081}$	18.88180599
	5.2 км	$0.1057128e^{-075}$	18.4847804	$0.562508e^{-105}$	21.81480987
100 Гбит/с	2.4 км	1	0	1	0
	11 км	1	0	1	0
	9 км	1	0	1	0

Формат модуляции		NRZ		RZ	
Скорость передачи	Длина линии	Показатели эффективности		Показатели эффективности	
		BER	Q-фактор	BER	Q-фактор
	5.2 км	1	0	1	0
200 Гбит	2.4 км	1	0	1	0
	11 км	1	0	1	0
	9 км	1	0	1	0
	5.2 км	1	0	1	0

По результатам моделирования был построен график зависимости Q-фактора от скорости передачи данных, изображенный на рисунке 2. Из графика видно, что с увеличением скорости передачи с 10 до 100 Гбит/с оба формата модуляции демонстрируют существенное снижение Q-фактора, что указывает на деградацию качества сигнала и увеличение вероятности ошибок. При скорости 200 Гбит/с оба формата теряют способность надежно передавать данные (Q-фактор = 0), однако RZ-модуляция сохраняет лучшие показатели качества при высоких скоростях (20.59 против 12.91 на 100 Гбит/с), что делает её более предпочтительной для высокоскоростных оптических систем.

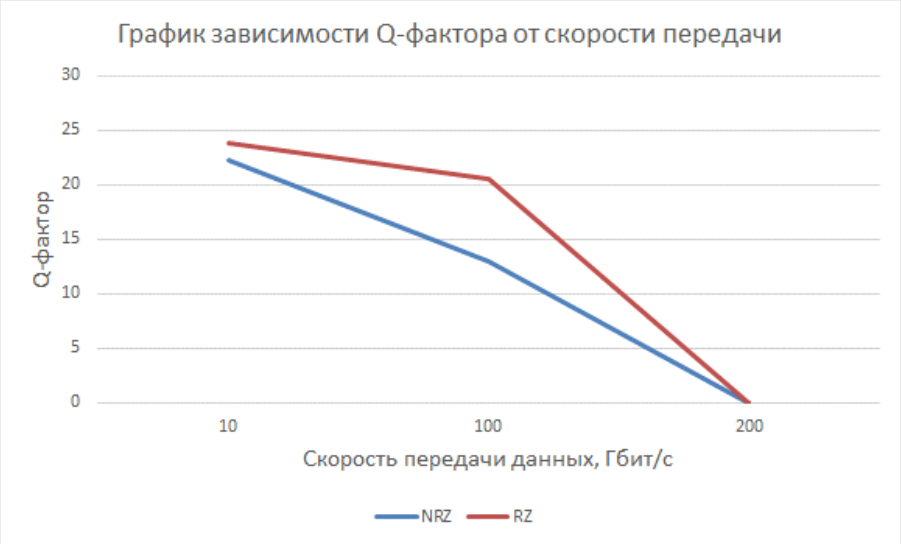


Рисунок 2 – График зависимости Q-фактора от скорости передачи

Ситуация существенно меняется при рассмотрении полного 30-километрового участка линии и при увеличении скорости передачи. Для линии длиной 30 км при скорости 10 Гбит/с в OptiSystem получены значения Q-фактора порядка 10,96 и минимального BER $\approx 2{,}7 \cdot 10^{-28}$, что свидетельствует о высокой надёжности передачи данных в этих условиях. При этом глаз-диаграмма для обоих форматов (NRZ и RZ) остаётся заметно открытой: уровни логических «0» и «1» хорошо разделены как по амплитуде, так и по времени, а межсимвольная интерференция выражена слабо. При увеличении

скорости до 100 Гбит/с временной интервал между битами сокращается в 10 раз, поэтому то же самое дисперсионное уширение приводит к значительно более сильному перекрытию импульсов. В моделировании это приводит к заметному ухудшению Q-фактора (до значений порядка 4,86) и росту BER до величин порядка $5{,}75 \cdot 10^{-7}$ для полного 30-километрового линка, что уже не удовлетворяет требованиям к магистральным системам связи без применения специальных мер по компенсации дисперсии. На глаз-диаграммах при 100 Гбит/с «глаз» значительно заужен по вертикали и горизонтали: уровни «0» и «1» плохо разделены, временные окна решений малы, а пересечения траекторий сигналов могут приводить к ошибкам приёма. Для разных параметров ВОСП в ходе моделирования были получены: временная диаграмма, спектрограмма и глаз-диаграмма форматов NRZ и RZ, которые представлены на рисунках 3-6.

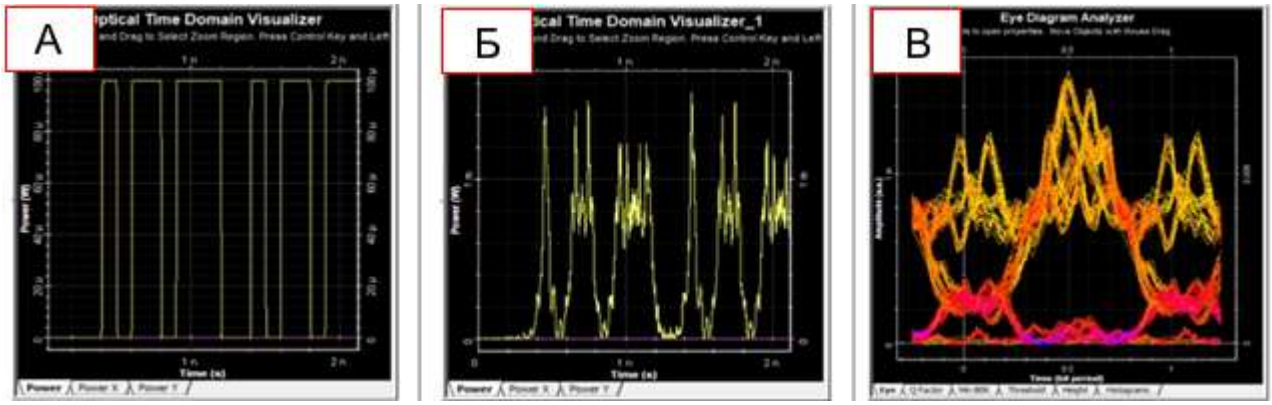


Рисунок 3 - Входной сигнал (А), выходной сигнал (Б) и глаз диаграмма (В) для скорости 10 Гбит/с и формата NRZ.

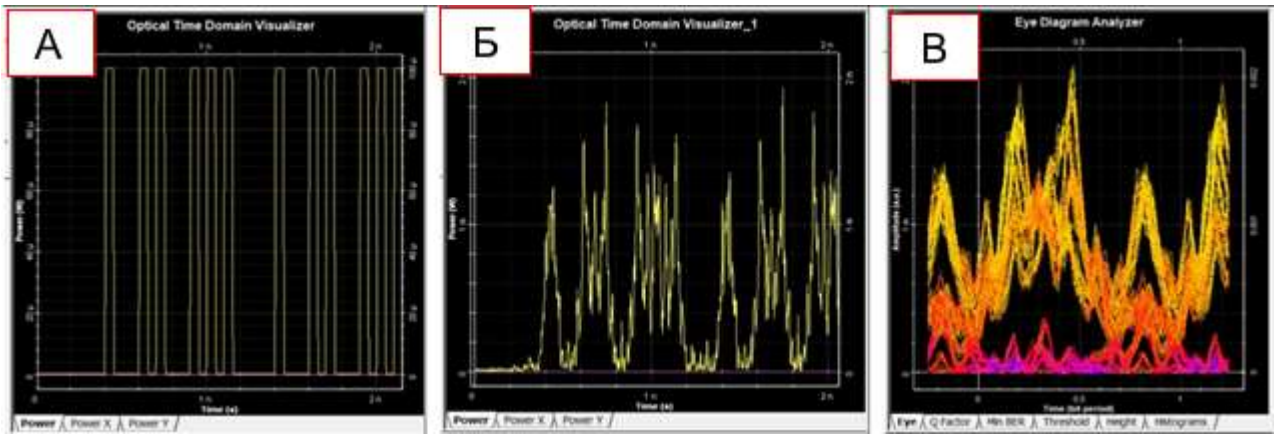


Рисунок 4 - Входной сигнал (А), выходной сигнал (Б) и глаз диаграмма (В) для скорости 10 Гбит/с и формата RZ.

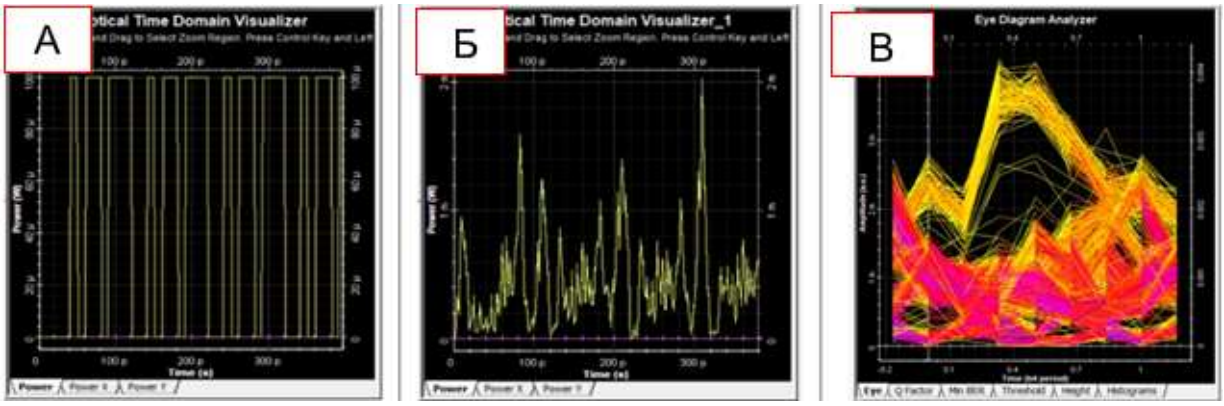


Рисунок 5 - Входной сигнал (А), выходной сигнал (Б) и глаз диаграмма (В) для скорости 100 Гбит/с и формата NRZ.

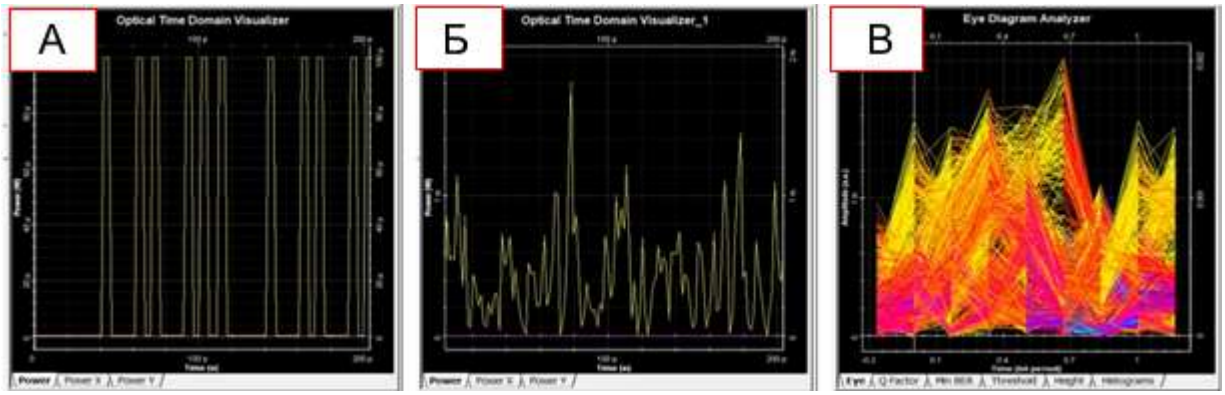


Рисунок 6 - Входной сигнал (А), выходной сигнал (Б) и глаз диаграмма (В) для скорости 100 Гбит/с и формата RZ.

При дальнейшем увеличении скорости до 200 Гбит/с результаты моделирования показывают практически полное закрытие глаза как для NRZ, так и для RZ: траектории сигналов заполняют всё окно наблюдения, отсутствует отчётливое разделение уровней, что эквивалентно BER, близкому к единице и полной потере информации. Таким образом, в рамках принятых параметров волокна и без специальных средств дисперсионной компенсации исследуемая линия на волокне G.652.D обеспечивает приемлемое качество передачи для скорости 10 Гбит/с, но не способна надёжно передавать данные на 100 и тем более 200 Гбит/с.

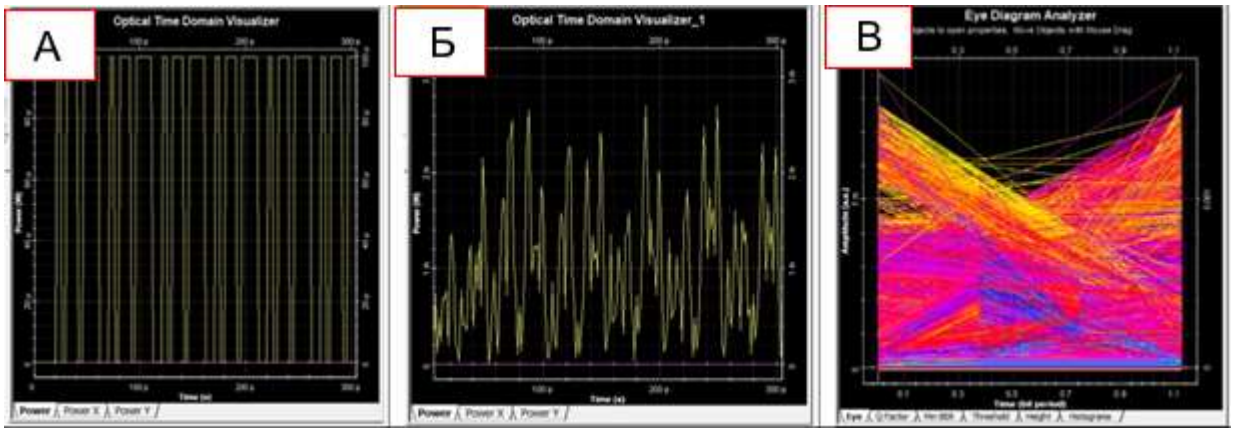


Рисунок 7 - Входной сигнал (А), выходной сигнал (Б) и глаз диаграмма (В) для скорости 200 Гбит/с и формата NRZ.

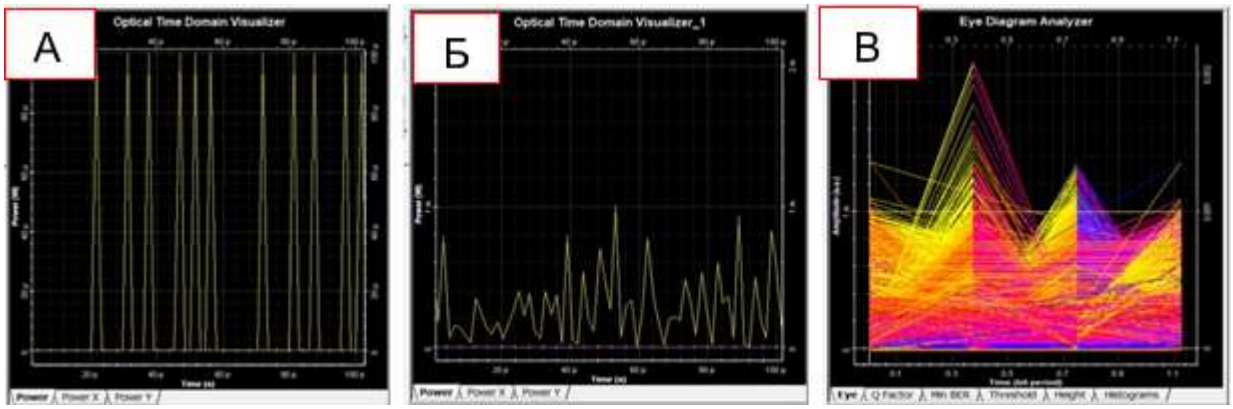


Рисунок 8 - Входной сигнал (А), выходной сигнал (Б) и глаз диаграмма (В) для скорости 200 Гбит/с и формата RZ.

Проведённое моделирование показало, что при фиксированных параметрах волокна ITU-T G.652.D и без дисперсионной компенсации, выбор формата линейного кодирования напрямую влияет на Q-фактор и BER: на коротких участках линии и при скорости 10 Гбит/с формат RZ обеспечивает более высокий Q-фактор и меньший коэффициент битовых ошибок за счёт лучшей временной локализации импульсов и меньшей межсимвольной интерференции, тогда как на более длинных отрезках и при росте скорости преимущество переходит к формату NRZ, обладающему более узким спектром и лучшей устойчивостью к накопленной хроматической дисперсии.

Заключение

Результаты проведённого моделирования подтверждают, что универсального линейного кода не существует. Выбор между RZ и NRZ должен осуществляться с учётом конкретных требований к системе и поставленных задач. Для магистральных линий, где критична спектральная эффективность и необходимо разместить десятки каналов в ограниченном спектральном диапазоне, предпочтительным оказывается формат NRZ или его

модификации с пониженной спектральной шириной. Для сравнительно коротких линий целесообразно рассматривать формат RZ.

Список литературы:

1. Agrawal G. P. Fiber-Optic Communication Systems. – 4th ed. – New York: Wiley, 2010. – 626 p.
2. Agrawal G. P. Nonlinear Fiber Optics. – 5th ed. – New York: Academic Press, 2013. – 648 p.
3. Соловьёв В. А., Кузнецов С. А. Волоконно-оптические системы передачи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 320 с.
4. Kaur H., Kaler R. S. Comparison of NRZ and RZ data modulation formats in SAC-OCDMA systems // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. – 2013. – Vol. 2, No. 8. – P. 3010–3014.
5. Sadinov S. Simulation study and analysis in transmitting RZ and NRZ coded signals into 10 Gbps optical line with optical amplifying sections // Electronics. – 2017. – Vol. 11, No. 2. – P. 10–18.
6. Rashed A. N. Z. Comparison between NRZ/RZ modulation techniques for upgrading optical wireless communication systems // Journal of Optical Communications and Networking. – 2022. – Vol. 43, No. 4. – P. 605–613.

УДК 624.012.45

Ли Юэхан, Ли Сюэ, Цуй Синьюй, Зулпуев А. М.
Ошский технологический университет имени М. Адышева, Ош, Кыргызстан

ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОНОЛИТНЫХ ПЛИТ, КОМБИНИРОВАННЫХ АРМИРОВАНИЕМ

Аннотация: статья посвящена экспериментальному исследованию прочности, жёсткости и трещиностойкости монолитных железобетонных плит перекрытий с комбинированным армированием — стальной стержневой и композитной полимерной арматурой. Проанализировано влияние соотношения разнородных арматурных материалов на несущую способность и деформативность плит при поперечном изгибе. Установлены закономерности перераспределения внутренних усилий между стальными и полимерными стержнями на различных стадиях нагружения. Обоснована необходимость уточнения нормативных расчётных методик применительно к конструкциям, армированным материалами с различными модулями упругости.

Ключевые слова: железобетонная плита, комбинированное армирование, прочность, жёсткость, изгиб, монолитная плита, несущая способность, трещинообразование, деформативность, композитная арматура.

Методологическую основу исследования составляют экспериментальные методы испытания железобетонных конструкций при поперечном изгибе, включающие кратковременное и длительное нагружение опытных образцов монолитных плит с различными схемами армирования. Применены методы прямого измерения прогибов, ширины раскрытия и шага трещин на различных стадиях напряжённо-деформированного состояния. Сравнительный анализ выполнен на основе сопоставления параметров плит с комбинированным и традиционным стальным армированием эквивалентного сечения.

Результаты и обсуждения

Задача снижения материалоёмкости несущих конструкций при сохранении требуемого уровня эксплуатационной надёжности остаётся одной из центральных в современном строительном проектировании. Применительно к монолитным железобетонным плитам перекрытий, работающим в условиях поперечного изгиба, перспективным направлением выступает внедрение комбинированных схем армирования — совместное использование традиционной стальной стержневой арматуры и композитных полимерных стержней. Такой подход позволяет задействовать различные механические свойства двух принципиально разнородных материалов в пределах одного сечения.

Проведённый цикл испытаний подтвердил, что комбинированное армирование расширяет диапазон проектных параметров плитных элементов. Введение композитной арматуры в растянутую зону наряду со стальными стержнями инициирует перераспределение внутренних усилий,

интенсивность и характер которого определяются соотношением модулей упругости применяемых материалов и их долей в поперечном сечении.

При анализе прочностных показателей изгибаемых монолитных плит с комбинированным армированием установлено, что их несущая способность при кратковременном нагружении возрастает на 12–18 % относительно плит, армированных исключительно стальными стержнями эквивалентного сечения. Природа этого прироста связана с высокой прочностью композитной полимерной арматуры на растяжение: после достижения стальными стержнями предела текучести именно полимерные стержни воспринимают дополнительную долю растягивающих напряжений. Существенно, однако, что данный эффект реализуется преимущественно на завершающих стадиях нагружения — при уже развитых пластических деформациях стали. До момента образования первых нормальных трещин поведение комбинированно армированных плит практически не отличается от поведения традиционно армированных аналогов, поскольку основную роль в восприятии растягивающих усилий играет бетон [10].

Иначе говоря, вклад композитной арматуры в несущую способность проявляется не сразу, а нарастает по мере исчерпания ресурса стальных стержней.

Жёсткость изгибаемых железобетонных плит с комбинированным армированием требует дифференцированного рассмотрения по стадиям напряжённо-деформированного состояния. В дотрещинной стадии жёсткость сечения обусловлена главным образом геометрическими характеристиками приведённого сечения и модулем упругости бетона; влияние типа армирования при этом минимально. После образования трещин ситуация меняется. Композитная арматура, обладая пониженным — по сравнению со сталью — модулем упругости, вносит меньший вклад в жёсткость трещиноватого сечения. Как следствие, прогибы комбинированно армированных плит на эксплуатационном уровне нагружения превышают прогибы стально-армированных аналогов на 8–15 %, причём величина отклонения зависит от доли композитной арматуры в общем проценте армирования.

Данное обстоятельство указывает на необходимость корректировки расчётных методик определения деформативности. В действующих нормативных моделях неоднородный характер совместной работы арматурных материалов с различными деформационными свойствами учитывается недостаточно. В настоящем исследовании показано, что повышение доли стальной арматуры в комбинированной схеме до определённого оптимального значения позволяет компенсировать избыточную деформативность, не утрачивая при этом прочностных преимуществ.

Трещинообразование в монолитных железобетонных плитах с комбинированным армированием обладает рядом характерных особенностей.

Момент появления первых трещин определяется прочностью бетона на растяжение и практически не зависит от типа армирования. Дальнейшее же развитие трещин протекает иначе, нежели в традиционно армированных конструкциях. Пониженный модуль упругости композитной арматуры допускает большие деформации растянутой зоны, вследствие чего формируется более частая сетка трещин при меньшей ширине их раскрытия. Результаты прямых измерений свидетельствуют: максимальная ширина раскрытия трещин на эксплуатационном уровне нагрузки составляет 0,18–0,25 мм, что не выходит за нормативные пределы, тогда как среднее расстояние между трещинами сокращается на 15–22 % относительно контрольных образцов [8].

С практической точки зрения более равномерное распределение деформаций вдоль пролёта плиты снижает вероятность локальной концентрации повреждений и, соответственно, благоприятно влияет на долговечность конструкции.

Отдельного рассмотрения заслуживает влияние длительного действия нагрузки на деформативность комбинированно армированных плит. Ползучесть бетона сжатой зоны приводит к постепенному перераспределению напряжений между арматурными материалами. Композитная арматура, не подверженная ползучести и релаксации в той мере, в какой им подвержена сталь, со временем принимает на себя возрастающую долю усилий. Этот процесс, с одной стороны, повышает долговременную прочностную надёжность конструкции, а с другой — обусловливает дополнительный прирост прогибов вследствие нелинейного перераспределения деформаций в сечении. За шестимесячный период выдержки под постоянной нагрузкой прогибы комбинированно армированных образцов увеличились на 35–42 % относительно мгновенных значений; для стально-армированных плит аналогичный прирост составил 28–34 %. Полученные данные обосновывают необходимость введения поправочных коэффициентов при расчёте длительных прогибов конструкций с комбинированным армированием.

Таблица 1 — Сравнительные характеристики плит с различными схемами армирования

Параметр	**Стальное армирование**	**Комбинированное армирование**	**Отклонение, %**
Разрушающий момент, кН·м	48,6	55,9	+15,0

Параметр	**Стальное армирование**	**Комбинированное армирование**	**Отклонение, %**
Прогиб при эксплуатационной нагрузке, мм	6,2	7,1	+14,5
Ширина раскрытия трещин, мм	0,28	0,22	−21,4
Среднее расстояние между трещинами, мм	124	101	−18,5
Прирост прогиба при длительной нагрузке, %	31	39	+25,8

Выводы

На основании полученных результатов можно заключить, что комбинированное армирование монолитных железобетонных плит перекрытий представляет собой конструктивное решение, позволяющее повысить несущую способность при изгибе и улучшить показатели трещиностойкости. Применение данного подхода, вместе с тем, требует уточнения нормативных методик расчёта жёсткости и деформативности — с учётом специфики совместной работы разнородных арматурных материалов. Полученные экспериментальные данные формируют основу для построения расчётных моделей, адекватно описывающих поведение комбинированно армированных плит на всех стадиях напряжённо-деформированного состояния.

Список литературы:

1. Антаков, И. А. Деформативность изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой / И. А. Антаков, А. М. Сулейманов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – № 3(65). – С. 101-109. – DOI 10.52409/20731523_2023_3_101. – EDN HJVCIL.

2. Джамуев, Б. К. Влияния несъемных пустотообразователей на прочность защемленных по контуру монолитных железобетонных плит перекрытия / Б. К. Джамуев // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 2(112). – С. 3-15. – DOI 10.33979/2073-7416-2024-112-2-3-15. – EDN RWTWNE.

3. Кайдас, П. А. Прочность монолитных и сборно-монолитных изгибаемых железобетонных элементов при различном характере диаграмм состояния бетона / П. А. Кайдас, С. Р. Меликсетян, О. О. Коренькова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2025. – № 3(53). – С. 11-16. – DOI 10.52684/2312-3702-2025-53-3-11-16. – EDN UPQIYZ.

4. Кудяков, К. Л. Особенности проектирования монолитных бетонных фундаментных плит с композитной полимерной арматурой / К. Л. Кудяков, А. В. Бучкин // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 6. – С. 892-905. – DOI 10.22227/1997-0935.2024.6.892-905. – EDN KIIJJC.

5. Мирсаяпов, И. Т. К расчету прогибов изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой / И. Т. Мирсаяпов, И. А. Антаков, А. Б. Антаков // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16, № 4. – С. 413-428. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.4.413-428. – EDN OSLXAT.

6. Саврасов, И. П. Исследование прочности, деформативности и трещиностойкости железобетонных плит, армированных сварными заводского изготовления и вязаными изделиями / И. П. Саврасов, М. С. Востров // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2022. – Т. 78, № 8. – С. 705-717. – DOI 10.32339/0135-5910-2022-8-705-717. – EDN ACABAK.

7. Хотько, А. А. Прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных многопустотных плит, усиленных стеклопластиковой арматурой / А. А. Хотько, И. В. Даниленко // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : Сборник статей VI Международной научной конференции, Новополоцк, 30–31 октября 2024 года. – Новополоцк: Полоцкий государственный университет им. Евфросинии Полоцкой, 2025. – С. 166-174. – EDN SSTEQS.

8. Шарифов, А. Х. Анализ экспериментальных данных облегченных железобетонных плит с комбинированным армированием / А. Х. Шарифов // Архитектура, строительство, транспорт. – 2022. – № 4. – С. 36-45. – DOI 10.31660/2782-232X-2022-4-36-45. – EDN FOKVMN.

9. Шарифов, А. Х. Облегченная железобетонная плита с комбинированным армированием / А. Х. Шарифов, Ю. А. Иващенко, А. Д. Рахмонзода // Строительство и застройка: жизненный цикл - 2022 : Материалы VI Международной (XII Всероссийской) конференции, Чебоксары, 23–24 ноября 2022 года. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2022. – С. 163-173. – EDN TRROOG.

10. Шарифов, А. Х. Экспериментальные исследования прочности, жесткости и трещиностойкости облегченных плит с комбинированным армированием / А. Х. Шарифов, Ю. А. Ивашенко, А. Д. Рахмонзода // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 5-15. – DOI 10.14529/build210401. – EDN EVVRMG.

УДК 72.01

Габова В. А., Габов В. Ю.
Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия

ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ АРХИТЕКТУРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОВРАЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НИЖНЕГО НОВГОРОДА

Аннотация: в статье анализируются опыт, методы и принципы архитектурного преобразования овражных территорий Нижнего Новгорода. Произведен морфологический анализ Сергиевского оврага. Методы и принципы систематизированы и отражены в виде графических изображений. Также, на основе Нижегородского опыта, рассмотрены и систематизированы приемы внедрения архитектурных объектов в овражно-балочные территории. Сделаны основные выводы по теме исследования.

Ключевые слова: архитектурное преобразование, овраг, благоустройство, проектирование, методы, принципы.

Освоение оврагов в структуре города является актуальной задачей для градостроительства, поскольку овражные территории имеют большой потенциал в экологическом и функциональном аспектах, которые в свою очередь могут приносить пользу городу.

Планировка города учитывает особенности овражно-балочного рельефа, но полное подчинение или игнорирование его нерационально. Учет особенностей рельефа необходим в зонировании и структурном членении города для определения дальнейшего его развития, как нового интегрированного элемента.

Включение оврагов в городскую структуру города путем его архитектурного преобразования, как отмечал Казнов «…позволяет перенести их из категории «бросовых» и «неудобных земель» в земли пригодные для застройки» [1]. В связи с этим возникла идея в изучении методов и принципов преобразования овражных территорий Нижнего Новгорода и разработки концептуального решения архитектурного преобразования территории Сергиевского оврага.

Нижний Новгород основан, как крепость, на системе холмов, именуемых как «Дятловы горы». Дятловы горы — это семь холмов, расположенных на правом высоком берегу в месте слияния рек Оки и Волги. Они образуют уникальный природный и исторический ландшафт, который сыграл ключевую роль в формировании города и его оборонительной системы. Их названия: Сокол, Гребешок, Гремячья, Бушевая, Часовая, Соборная и Егорьевская. Они и формируют сложную овражно-балочную систему, которая территориально занимает 30% в нагорной части Нижнего Новгорода.

В 2000-ом году была определена площадь «бросовых» земель в существующих границах нагорной части, к которым относятся овражные и прибрежно-склоновые территории в размере 1940га где: 40,8% неиспользуемых территорий; 3,1% набережная; 32,7% зеленые насаждения общего пользования и специального насаждения; 2,6% улицы и дороги;11,8%кварталы с малоэтажной застройкой; 2,4% коммунально-складские территории; 6,6% кварталы с многоэтажной застройкой [2]. Они являются ресурсом с большим потенциалом развития городской инфраструктуры. Осваивая «бросовые» территории, повышается интенсивность использования городской территории, при котором город развивается, как компактное организованной пространство на градостроительном уровне.

Далее изучен опыт освоения овражно-балочных территорий Нижнего Новгорода на примере архитектурной застройки различной типологии и ландшафтно-архитектурного благоустройства.

Жилая застройка разнообразна вариабельностью типов объемно-пространственных и планировочных решений и методов рекультивации территории. Можно выделить дифференцированные и комбинированные решения по способом привязки зданий к рельефу, и ликвидируемые и террасируемые методы ликвидации эрозионных оснований.

Ликвидация эрозионных оснований участка путем засыпки является самым дорогостоящим, но самым удобным методом для дальнейшего строительства зданий. Ровная площадка позволяет строить по любым типовым проектам, но при этом обезличивает природный ландшафт, лишая его индивидуальности. Тип застройки типовой на равнинном основании.

Метод террасирования предполагает сохранение рельефа путем организации микротеррас на пологих склонах с частичной подсыпкой тальвега оврага. Эрозионные основания больших размеров сохраняются и осваиваются их дно и склоны. В данном случае тип застройки разнообразен, поскольку возможна ступенчатая застройка, по направлению склона, поперек склона с организациями выходов на различных уровнях.

Примерами служат: жилая застройка в Ковалихинском овраге; освоение склоновой территории под жилую застройку по улице Ильинская; жилой дом на улице Провиантской; освоение склоновой территории в жилом районе «Кузничиха-2» по улице Рокосовского и другие.

Промышленная и складская застройка предполагает, в основном, преобразование рельефа для строительства обычных зданий. Данное решение обусловлено сложностью технологических процессов, которые предполагают размещение комплекс взаимосвязанных зданий. Возможны случаи расположения вспомогательных объектов на террасированных склонах и подсыпанном дне оврага. Также возможны и случаи адаптации технологических схем к сложному рельефу с использованием его перепадов для облегчения транспортировки сырья на разные уровни.

В качестве примера подходят: Винодельческий завод в Почаинском овраге; центр оптовой торговли «Альянс» на склоне Изоляторского оврага; склады на Волжском склоне.

Административные здания, в плане освоения рельефа аналогичны способам освоения жилой застройкой. Единственное отличии в типологии и нормативным требованиям к ней. В связи с этим и рождаются уникальные архитектурно-планировочные и объемно-пространственные решения отличные от решений жилой застройки.

Примеры административных зданий, расположенных на овражных территориях: здание администрации Советского района на засыпанном отвершке Ковалихинского оврага; здание МП «Инженерная защита города на склоне; Главпочтамп на засыпанном отвершке Звездинского оврага.

Культовым зданиям свойственно расположение на склоновых прибрежных территориях и бровках оврага, поскольку они с давних времен служили архитектурными доминантами городского силуэта. И из религиозных соображений располагались на вершинах холмов и овражных территорий.

Яркими примерами служат: Печерский монастырь на Волжском склоне; Строгоновская (Рождественская) церковь; Благовещенский монастырь на Окском склоне; храм Иоанна Предтечи.

Культурно-просветительные учреждения интересен комбинаций открытых и закрытых пространств и их перетеканием из одного в другое. Таковыми являются павильоны-читальни, эстрады, выставочные павильоны открытого и закрытого типа, трибуны и амфитеатры и т.д. Павильоны рекомендуется размещать на склонах до 15 градусов с шириной павильона не более шести метров и площадкой перед входом не менее трех метров. В отличии от предыдущих типов застройки, в данном типе более низкие требования к территории и нормативные к архитектуре. Особенностью является возможность построения выразительной архитектурной композиции с использованием перепадов рельефа и организацией улучшенных визуальных связей.

В качестве примера приведены: этнографический музей на Щелковском хуторе; кинотеатр «Электрон» на засыпанном отвершке оврага.

Предприятия торговли и общественного питания особенно интересны сточки зрения освоения овражно-балочных территорий. Архитектура таких объектов всегда уникальна за счет многофункциональности и стилистической привлекательности. За счет сложного рельефа можно создавать неповторимые здания и сооружения с уникальными архитектурно-планировочными и объемно-пространственными решениями. Решение может представлять как единый многофункциональный объем, так и комплекс монофункциональных и многофункциональных объемов.

Примерами служат: ресторан «ГАРДИНИЯ» на верхне-Волжской набережной; торгово-развлекательный центр «Жар-Птица» на частично

заспанном овраге; ресторан «Булацкая слободка» в Александровском саду; ресторан «Симфония» в Щелковском овраге.

Коммунальные здания и сооружения имеют особое значение в связи острой нехваткой гаражей, стоянок и предприятий технического обслуживания. Решающее влияние на выбор типа здания гаража наряду с экономическими факторами оказывают природные условия и прежде всего рельеф участка [3] Гаражи боксового типа располагают на подсыпанном дне оврагов и балок, а также их склонов с различной компоновкой по ширине и высоте. Пологие склоны предполагают многоуровневое расположение боксов так, что нижний бокс высотой до основания верхнего бокса.

Крутые склоны могут быть застроены многоуровневыми гаражи с выездами на разных уровнях. В Нижнем Новгороде имеется большой опыт в строительстве гаражей такого типа: кооперативный и грузовые гаражи на Тверском проезде, для спецмашин и гараж на 100 машино-мест на улице Козицкого.

Также примерами служат гаражи индивидуальных автомобилей: в овраге возле микрорайона №2 жилого района «Верхние Печеры», в овраге на улице Фруктовой.

Нехватку спортивных сооружение так же можно решить путем освоения овражно-балочных территорий. Данный тип застройки предполагает размещение объекта спортивного назначения и благоустройство территории спортивными площадками. Особенно эффективно располагать объекты требующих наклонных поверхностей, таких как: лыжные трамплины, горки для спуска на санях и лыжах, сноубордах. Такого типа сооружения требуют территории значительных размеров по протяженности и крутости уклона склонов, а также особой инженерной подготовки территории. Активность и протяженность рельефа можно использовать под «трассы здоровья» с площадками с различным гимнастическим оборудованием.

В качестве примера рассмотрены: комплекс трамплинов на Волжском склоне, стадион «Водник» на засыпанном Звездинском овраге, стадион «Радий» на склоне Дубеновского оврага, лыжная база на Щелковском Хуторе, «трасса здоровья» на Волжском склоне.

Лечебно-профилактические здания и сооружения. Строительство объектов с использование прилегающих территорий под лечебно-оздоровительные трассы – терренкуры, которые основаны на применении чередующихся нагрузок разной интенсивности.

Г.И. Клиориной разработана [4] классификация маршрутов терренкура, где выделяются четыре категории трудности маршрута: легкий, умеренный, средний, трудный.

Маршрут терренкура устроен при реконструкции в Александровском саду, который в свое время был основан на засыпанных оврагах и уположенных склонах.

Пешеходно-транспортные сооружения. Расчленение городской территории овражно-балочными системами вызывает значительные увеличение протяженности улиц, усложнение их конфигурации, а также необходимость устройства мостов, дамб. Их устройство подразумевает использование и сохранение естественных склонов оврага, проводя определенную инженерную подготовку. Происходит частичная засыпка и выравнивание тальвега оврага под требуемую ширину транспортной или пешеходной сети или укрепление склонов с дальнейшим строительством мостов. Так возможна организация террасированных спусков по склонам оврага.

Примеры: Чкаловская лестница, Ивановский съезд, Георгиевский съезд, Лыкова дамба, съезд к р. Оке по склону Б. Тобольского оврага, Трамвайные пути на склоне Почаинского оврага, пешеходный мост через Почаинский овраг, пешеходный мост через Почтовый съезд, пешеходный мост через Сергиевский овраг и др.

Зеленые насаждения. Организация рекреационных пространств на территории овражно-балочных территории является самым экологичным способом архитектурного преобразования. Создание общегородских парков, скверов, садов с общественными пространствами направлено на сохранение зеленого каркаса города, в котором овражно-балочная система играет большую роль, с целью повышение экологичности городской среды. Методы организации парков также подразумевают террасирование, засыпку, размывку склонов и тальвегов, но при этом идет не только архитектурное преобразование оврага, но и повышение экологичности путем организации разно-ярусных зеленых насаждений, а также водоемов.

В озеленении нагорной части Нижнего Новгорода можно выделить клинья, идущие по береговым оврагам Оки и Волги, а также клинья внутренних оврагов, связанных с природной зоной [5].

Парк Швейцария имеет значение общегородского парка. Его рельеф включает прибровочное плато, прибрежную террасу и склоны, а также несколько крупных оврагов: Большой и Малый Тобольский овраг, Холодный и Межевой.

На ликвидированных оврагах расположены: скверы на площади Минина и Пожарского, а также Звездинский бульвар.

Могут быть организованы ботанические сады, парки-музеи и парки-выставки такие как: Ботанический сад Нижегородского университета, парк-музей деревянного зодчества в Щелковском овраге.

Водные объекты. Создание искусственных прудов и озер в оврагах и балках – глубокая историческая традиция. Анализ архитектурно-планировочной структуры садов и парков Нижегородской области [6] говорит о том, что в сохраненных овражных территориях в большинстве случаев отводились под пруды. Водоемы выполняли хозяйственную, эстетическую и композиционную функцию, а также улучшают микроклимат и условия роста

зеленых насаждений. Возможно устройство не только отдельных водоемов, так и системы каскада прудов.

Исходя из анализа опыта освоения овражно-балочных территорий нагорной части Нижнего Новгорода были выявлены методы и принципы архитектурного преобразования овражных территорий.

Методы отражают пространственную организацию оврага для будущего предметного наполнения ее территорий. К основным методам относятся: метод ликвидации и террасирования, среди которых полная или частичная засыпка, замывка, микро-террасирование, геопластика и комбинированный (см. рис. 1).

Принципы отражают предметное заполнение овражно-балочных территорий. К основным принципам относятся: принцип экологизации, принцип органичной интеграции, принцип адаптации, принцип системности, принцип рационализации, принцип взаимодополняемости (см. рис. 1).

Также выявлены и систематизированы приемы внедрения архитектурных объемов в овражно-балочный рельеф (см. рис. 1).

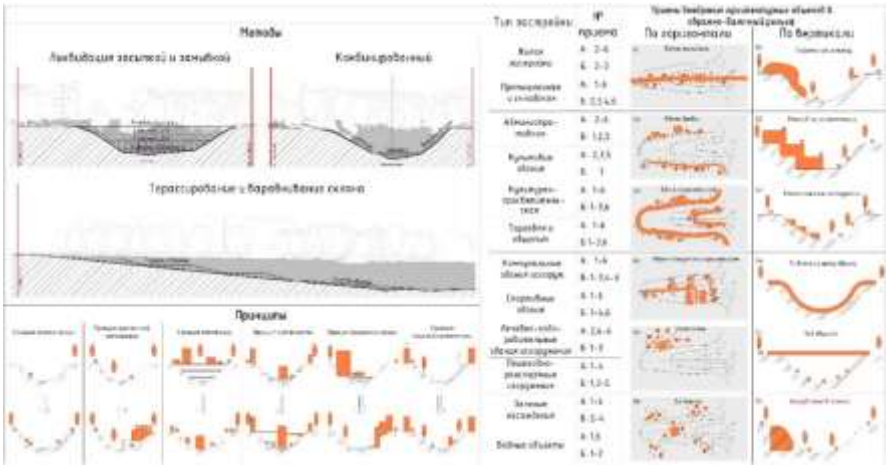


Рисунок 1. Методы, принципы архитектурного преобразования овражно-балочных территорий и приемы внедрения архитектуры в них

В рассматриваемой Нагорной части Нижнего Новгорода насчитывается около восемнадцати оврагов, среди которых рассматриваемый нами Сергиевский овраг. По данным таблицы характеристики оврагов Окско-Волжского косогора Сергиевский овраг имеет длину 490 метров, максимальную ширину 80 метров, глубину 20 метров уклон тальвега 7,1% и крутизну склонов в пределах 21-33 градусов [1, с. 9].

Изучены и определены уклоны и характерные точки и зоны Сергиевского оврага (см. рис. 2-3). Также овраг изучен на предмет наличия оползневых склонов и выявлено, что в 2013 году на правом склоне у основания пешеходного моста произошел сход грунта. По мнению экологов это произошло из-за недостатка естественных укреплений в виде зеленых насаждений, вследствие чего грунт перенасытился водой и произошел сход

грунта. Это говорит о том, что Сергиевский овраг требует дополнительных мер по инженерной подготовке территории и его архитектурному преобразованию.

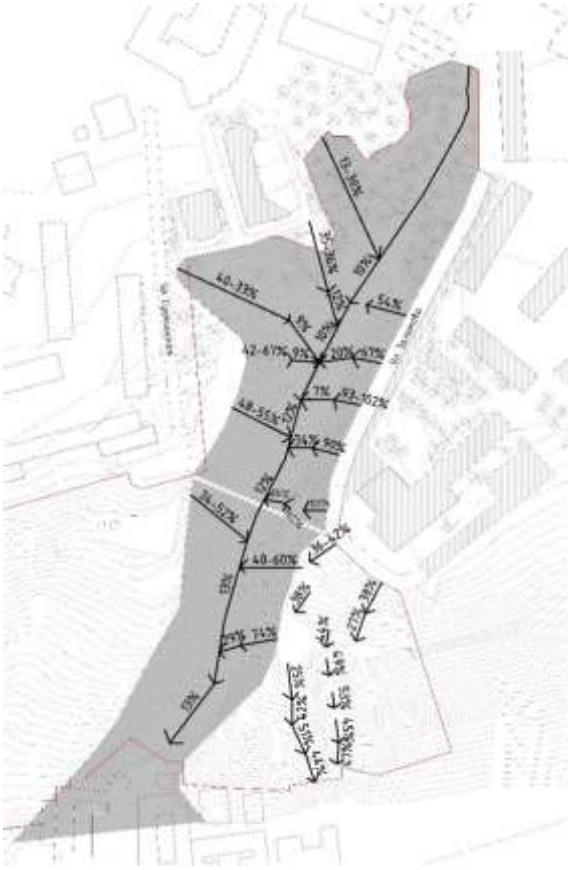


Рисунок 2. Схема анализа уклонов Сергиевского оврага

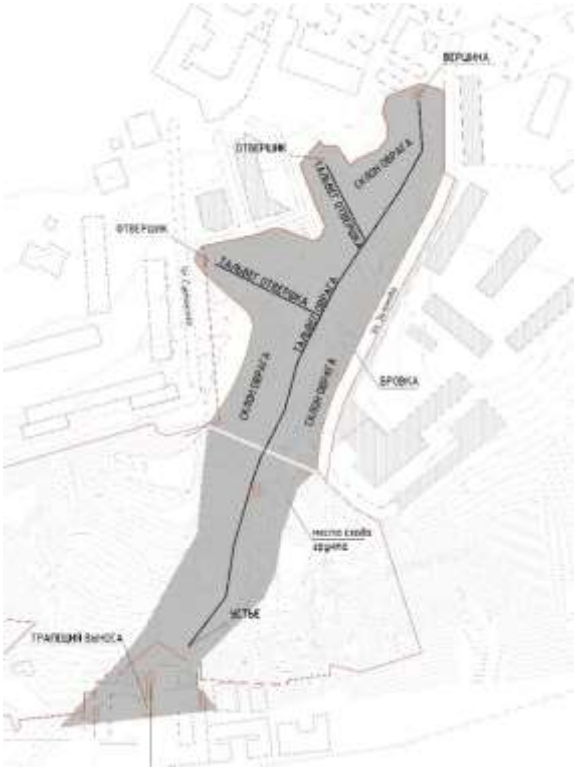


Рисунок 3. Схема анализа характерных точек Сергиевского оврага

Основные выводы по теме исследования:

- Рассмотрен опыт освоения овражно-балочных территорий в нагорной части Нижнего Новгорода и было выявлено 12 типологических способов застройки (см. рис.1).
- Был произведен анализ уклонов, морфологии и наличия оползневых склонов Сергиевского оврага. Выявлено, что величины уклона находятся в диапазоне от 7 до 102 градусов. Имеются оползневые участки на прибрежных склонах. Овраг имеет 2 отвершка.
- Выявлены методы и принципы архитектурного преобразования овражно-балочных территорий на основе опыта Нижнего Новгорода. Выявлено три основных метода и шесть принципов (см. рис.1).
- Выявлены приемы внедрения архитектурных объектов в рельеф овражно-балочных территорий. Среди которых шесть по вертикали и шесть по горизонтали (см. рис.1).
- Произведена систематизация выше указанных методов, принципов и приемов (см. рис.1).

Список литературы:

1. Казнов, С.Е. Градостроительное освоение оврагов и склонов вг. Нижнем Новгороде /С.Е. Казнов. – Нижний Новгород: Типография «СПК», 2000. – 98 с.

2. Казнов, С.Д. К вопросу о рациональном использовании территории нагорной част г. Нижнего Новгорода / С.Д. Казнов // Сборник.: Проблемы реконструкции исторических центров крупных городов России. Тезисный доклад к Международной научно-практической конференции. – Нижний Новгород: 1994. – С.33-35.

3. Казнов, С.Д. Освоение городских оврагов под гаражи / С.Д. Казнов // Жилищное и коммунальное хозяйство, 1994, №6. – С.19-20

4. Клиорина, Г.И. Инженерная подготовка городских территорий / Г.И. Клиорина, В.А.Осин, М.С. Шумилов. – Москва: Высшая школа, 1984. – 271 с.

5. Казнов, С.Д. прибрежные склоны и овраги в городе / С.Д. Казнов, В.В. Баулина // Жилищное и коммунальное хозяйство, 1981, №2. – С.30-31

6. Крогиус, В.Р. Градостроительство на склонах / В.Р. Крогиус и др. – Москва: Стройиздат, 1988. – 328 с.

УДК 658.589

Худоногов С. А.
Научный руководитель: Погоняйченко И. Ю.
Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета, Саяногорск, Россия;
АО «Гидроремонт-ВКК»

ПРОЕКТНО-РАСЧЁТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ЗРУ 220 КВ КОЛЫМСКОЙ ГЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ КРУЭ

Аннотация: в статье выполнено проектно-расчётное обоснование реконструкции закрытого распределительного устройства (ЗРУ) 220 кВ Колымской ГЭС с применением комплектного распределительного устройства элегазового исполнения (КРУЭ). Объект реконструкции расположен внутри помещения здания ЗРУ-220 кВ, размещённого на крыше административного корпуса, что формирует повышенные требования к электробезопасности, электромагнитной совместимости (ЭМС), качеству электроэнергии и эксплуатационной надёжности. На основе требований ПУЭ и ГОСТ 32144–2013, а также сопоставления с IEC 61000 и EN 50160 выполнены расчёты токов короткого замыкания, проверки термической и электродинамической стойкости, оценка гармонических искажений напряжения (THD) до и после реконструкции. Представлен подбор основного оборудования КРУЭ российского производства и приведены расчётные показатели улучшения качества электроэнергии. Выполнена технико-экономическая оценка (простая и дисконтированная) окупаемости проекта. Результаты могут быть использованы при подготовке проектной документации на реконструкцию ЗРУ 220 кВ Колымской ГЭС и для аналогичных объектов гидроэнергетики.

Ключевые слова: ЗРУ 220 кВ, КРУЭ, Колымская ГЭС, реконструкция, токи короткого замыкания, термическая стойкость, электродинамическая стойкость, гармоники, THD, качество электроэнергии, ЭМС, окупаемость.

1.Нормативная база и требования, применяемые в проекте реконструкции.

Распределительные устройства высокого напряжения являются критическим элементом выдачи мощности гидроэлектростанций в энергосистему. Для Колымской ГЭС надёжность ЗРУ 220 кВ определяет устойчивость электроснабжения региона. Эксплуатация оборудования с длительным сроком службы приводит к росту отказов, усложнению обслуживания и снижению соответствия современным требованиям по безопасности и качеству электроэнергии.

Особенностью рассматриваемого объекта является то, что ЗРУ-220 кВ Колымской ГЭС расположено внутри помещения здания, размещённого на крыше административного корпуса. Это означает:

- наличие постоянного персонала вблизи оборудования высокого напряжения;
- повышенные требования к электромагнитной обстановке и ЭМС внутри здания;

- критичность компактности и технологичности оборудования при реконструкции;
- важность снижения пожароопасных факторов (в т.ч. связанных с устаревшими типами выключателей).

Целью работы является обоснование реконструкции ЗРУ 220 кВ с применением КРУЭ на основе нормативных требований и инженерных расчётов.

2. Нормативные требования и исходные данные

2.1 Применяемые нормативные документы

В статье используются нормативные документы и применяются следующим образом:

- **ПУЭ** — требования к РУ высокого напряжения, коммутационной способности, защитным мерам и стойкости оборудования к токам КЗ;
- **ГОСТ 32144–2013** — нормирование качества электроэнергии, включая гармонические искажения (THD и отдельные гармоники);
- **IEC 61000 (серия)** — подходы к оценке ЭМС и гармоник (в части сопоставления методик и терминологии);
- **EN 50160** — характеристики напряжения в сетях общего назначения (как ориентир для сопоставления подходов).

2.2 Исходные данные для расчётного пример.

Для демонстрации расчётной методики и оформления (с возможностью замены на точные проектные данные) принимаются параметры узла 220 кВ:

- номинальное напряжение:
- эквивалентное сопротивление сети в точке КЗ: Zэкв=3,6Ω
- коэффициент ударного тока: kуд=1,8k
- время отключения КЗ существующим оборудованием: t_{old}=1,0 с
- время отключения КЗ после реконструкции (быстродействующая РЗА + КРУЭ): t_{new}=0,6 с

3. Инженерные расчёты режимов работы и аварийных воздействий ЗРУ 220 кВ

Ток трёхфазного КЗ:

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_n}{\sqrt{3}\cdot Z_{\text{экв}}} = \frac{220\cdot 10^3}{\sqrt{3}\cdot 3{,}6} \approx 35300\ \text{А} = 35{,}5\text{кА}\ (1)$$

Вывод: оборудование должно иметь коммутационную способность не ниже **40 кА** (с запасом).

Ударный ток короткого замыкания

$$I_{\text{уд}} = k_{\text{уд}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k3} = 1{,}8 \cdot 1{,}414 \cdot 35{,}5 \approx 89{,}9 \approx 90\ \text{кА}\ (2)$$

Проверка термической стойкости по критерию $I\sqrt{t}$.

Требуемая термостойкость:

$I_{\text{терм}} = I_{k3}\sqrt{t}$ (3)

Для существующего ЗРУ:

$I_{\text{терм}} = 35{,}5 \cdot \sqrt{1.0} = 35{,}5$ кА.

Для реконструкции (КРУЭ):

$I_{\text{терм}} = 35{,}3 \cdot \sqrt{0{,}6} = 27{,}4$ кА.

Практический смысл: уменьшение времени отключения с 1,0 до 0,6 с снижает требуемую термическую стойкость примерно на 22–23%, повышая запас нагрева шин/контактных соединений.

Таблица 1 – Параметры расчета КЗ и стойкости

Показатель	Единицы	ЗРУ	КРУЭ
Номинальное напряжение	кВ	220	220
Эквивалентное сопротивление	Ом	3,6	3,6
Ток 3-ф КЗ	кА	35,3	35,3
Коэф. ударного тока	-	1,8	1,8
Ударный ток	кА	90	90
Время отключения	с	1,0	0,6
Требуемая термостойкость	кА	35,3	27,4
Относительная величина теплового воздействия	-	1,0	0,6

Данные, представленные в таблице 1, характеризуют расчётные режимы короткого замыкания в узле 220 кВ и позволяют оценить влияние реконструкции ЗРУ на тепловую и электродинамическую нагруженность оборудования.

Расчётный ток трёхфазного короткого замыкания $I_{кз}$=35,3 кА является определяющим параметром при выборе коммутационной способности выключателей и проверке стойкости токоведущих частей. Полученное значение близко к верхнему диапазону типовых токов КЗ для сетей напряжением 220 кВ, что свидетельствует о необходимости применения оборудования с повышенным запасом по отключающей способности. Выбор выключателей с номинальным током отключения 40 кА обеспечивает запас порядка 13 %, что соответствует требованиям ПУЭ и практике проектирования распределительных устройств высокого напряжения.

Ударный ток короткого замыкания $I_{уд}$≈ 90 кА определяет максимальные электродинамические усилия, действующие на токоведущие части и элементы крепления. Такие значения требуют применения конструкций с гарантированной механической прочностью и устойчивостью к динамическим

нагрузкам. В условиях размещения ЗРУ внутри здания данный фактор имеет особое значение, поскольку механические повреждения шин и опор могут приводить к вторичным авариям и нарушению целостности строительных конструкций.

Сравнение времени отключения короткого замыкания до и после реконструкции показывает принципиальное отличие эксплуатационных режимов. Для существующего ЗРУ принято время отключения t=1,0 с, тогда как для реконструированного ЗРУ с применением КРУЭ и современной микропроцессорной релейной защиты время отключения сокращается до t=0,6 с. Это сокращение напрямую отражается на величине требуемой термической стойкости токоведущих частей, выражаемой через показатель $I_{\text{кз}}\sqrt{t}$.

Так, требуемая термостойкость для существующего оборудования составляет 35,3 кА·, тогда как для реконструированного варианта она снижается до 27,4 кА. Относительное уменьшение тепловой нагрузки токоведущих частей составляет порядка 22–23 %, что подтверждается также снижением относительной тепловой нагрузки, пропорциональной величине I^2t до уровня 0,6 по сравнению с исходным состоянием. Указанное снижение означает уменьшение количества тепловой энергии, выделяемой в проводниках и контактных соединениях при коротком замыкании, и, как следствие, повышение ресурса оборудования и снижение вероятности термических повреждений.

Таким образом, анализ таблицы 1 показывает, что ключевым эффектом реконструкции ЗРУ 220 кВ является не снижение величины тока короткого замыкания, которая определяется параметрами энергосистемы, а существенное уменьшение времени его протекания и связанной с этим тепловой и механической нагрузки на оборудование. Это обстоятельство является одним из основных инженерных аргументов в пользу применения КРУЭ, обеспечивающего высокое быстродействие коммутационных аппаратов, стабильность параметров релейной защиты и повышение общей надёжности работы ЗРУ Колымской ГЭС.

Расчёт номинального тока шин по заданной мощности выдачи

Номинальный (расчётный) ток в узле 220 кВ при выдаче мощности P определяется выражением:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P}{\sqrt{3}\cdot U_{\text{н}}\cdot\cos\varphi} \quad (4)$$

где P — активная мощность выдачи, Вт;

$U_{\text{н}}$ – номинальное линейное напряжение В;

cosφ – коэффициент мощности (для генерации часто принимают 0,90–0,95 в расчётах на выдачу).

Принято для расчётного примера: $U_{\text{н}}$= 220 кВ, cosφ=0,95.

Рассмотрим несколько типовых уровней выдачи для узла 220 кВ (подставить реальные значения по Колымской ГЭС). Расчёт сведем в таблицу 2.

Таблица 2 – Номинальный ток шин при разных уровнях выдачи мощности.

P, МВт	$\cos\varphi$	$I_{ном}$, А	$I_{ном}$, кА
200	0,95	552	0,55
300	0,95	828	0,83
400	0,95	1104	1,10
500	0,95	1380	1,38

Вывод: даже при выдаче 500 МВт ток по шинам порядка 1,4 кА, что укладывается в классы шинных систем КРУЭ 220 кВ (обычно 3150 А или 4000 А по длительному току). Для окончательного выбора берётся максимум по режимам (выдача + перетоки + ремонтные схемы).

4. Анализ качества электроэнергии и гармонических искажений напряжения (THD)

4.1Значение показателей качества электроэнергии для ЗРУ 220 кВ внутри здания

Для распределительных устройств высокого напряжения, особенно расположенных внутри помещения (ЗРУ-220 кВ Колымской ГЭС находится на крыше административного корпуса и РУ размещено внутри), качество электроэнергии играет двойную роль:

1. Техническая надёжность силового оборудования. Высшие гармоники увеличивают дополнительные потери и нагрев в трансформаторах напряжения, тока, кабельных цепях, элементах РЗА, а также ускоряют старение изоляции.
2. Электромагнитная совместимость и вторичные цепи. При повышенных гармониках возрастает вероятность искажений измерений (ТН, ТТ), ложных срабатываний и ошибок цифровых устройств, что критично в помещении с плотной концентрацией вторичного оборудования.

4.2 Нормативные требования к гармоническим искажениям.

Критерии гармонических искажений в сетях электроснабжения регламентируются ГОСТ 32144–2013, а также согласуются по методологии с подходами стандартов IEC 61000 и EN 50160.

Основные показатели:

- Суммарный коэффициент гармонических искажений напряжения (THD_U, %);
- коэффициенты отдельных гармоник (5-й, 7-й, 11-й, 13-й и т.д.);

- длительность/частота превышений (для эксплуатационной оценки).

4.3 Формула THD и методика расчёта.

Суммарный коэффициент гармонических искажений напряжения определяется:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{N} U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (5)$$

где: U_1 — действующее значение основной (1-й) гармоники напряжения, В;

U_n — действующее значение n-й гармонической составляющей, В;

N — номер максимальной учитываемой гармоники (обычно 25, 40 или 50 — в зависимости от анализатора качества).

В инженерных расчётах часто используют относительные значения гармоник в процентах от основной:

$$h_n = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100\% \quad (6)$$

Тогда THD удобно считать сразу в процентах:

$$THD_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{N} h_n^2} \quad (7)$$

Это позволяет выполнять расчёты по данным анализатора качества электроэнергии, который выдаёт гармоники в процентах.

4.4 Расчёт THD для существующего ЗРУ 220 кВ (“до реконструкции”)

Исходные данные спектра гармоник (пример)

Для режима максимальной коммутационной активности и нелинейной нагрузки собственных нужд принимаются измеренные/оценочные уровни гармоник (в % от основной):

Таблица 3 – Гармоники напряжения до реконструкции.

Гармоника	$h_n, \%$
5	1,20
7	0,80
11	0,50
13	0,30
17	0,18
19	0,12
23	0,08
25	0,05

Подстановка в формулу THD

$THD_U = \sqrt{1{,}20^2 + 0{,}8^2 + 0{,}5^2 + 0{,}3^2 + 0{,}18^2 + 0{,}12^2 + 0{,}08^2 + 0{,}05^2} = 1{,}57\%$.

Полученное значение $THD_U \approx 1{,}57\%$ соответствует удовлетворительному уровню, однако следует учитывать:

- в реальных режимах присутствуют дополнительные гармоники выше 25-й;
- при коммутациях и переходных процессах возможны кратковременные “всплески”;
- при износе выключателей и ухудшении контактных соединений спектр гармоник становится менее устойчивым.

Поэтому эксплуатационное THD может находиться в диапазоне **1,8–2,1%**, что приближает значение к нормативной границе и повышает требования к модернизации.

4.5 Расчёт THD после реконструкции (“после внедрения КРУЭ”)

Ожидаемый спектр гармоник

Для КРУЭ принимается снижение гармоник за счёт:

- стабильного дугогашения;
- уменьшения коммутационных перенапряжений;
- снижения повторных зажиганий дуги;
- улучшенной ЭМС вторичных цепей.

Таблица 4 – Гармоники напряжения после реконструкции.

Гармоника	h_n, %
5	0,40
7	0,30
11	0,20
13	0,10
17	0,06
19	0,04
23	0,03
25	0,02

Подстановка в формулу THD

$THD_U = \sqrt{0{,}4^2 + 0{,}3^2 + 0{,}2^2 + 0{,}1^2 + 0{,}06^2 + 0{,}04^2 + 0{,}03^2 + 0{,}02^2} = 0{,}55\%$.

Результаты расчёта суммарного коэффициента гармонических искажений напряжения показывают существенное различие показателей качества электроэнергии для существующего ЗРУ 220 кВ и

реконструированного варианта с применением КРУЭ. Для существующего оборудования расчётное значение THDU_UU составляет порядка 1,57 %, тогда как после реконструкции и внедрения КРУЭ данный показатель снижается до 0,55 %.

4.6 Количественный вклад отдельных гармоник в THD.

Для оценки роли отдельных гармонических составляющих удобно рассмотреть квадраты относительных амплитуд, поскольку именно они формируют THD согласно формуле (7). В таблице 5 приведён вклад основных гармоник в суммарное значение THD_U.

Таблица 5 – Вклад отдельных гармоник в THDU

Гармоника	h_n% (до)	h_n^2	Доля THD, %	h_n%(после)	h_n^2	Доля THD, %
5	1,20	1,44	58,2	0,40	0,16	52,2
7	0,80	0,64	25,9	0,30	0,09	29,4
11	0,50	0,25	10,1	0,20	0,04	13,1
13	0,30	0,09	3,6	0,10	0,01	3,3
Прочие	-	0,056	2,3	-	0,006	2,0
Итого	-	2,476	100	-	0,306	100

Из данных таблицы 5 следует, что как в существующем ЗРУ, так и после реконструкции основной вклад в THD вносят 5-я и 7-я гармоники. Для режима до реконструкции суммарный вклад этих гармоник превышает 80 %, что типично для энергосистем с преобладанием:

- нелинейных нагрузок собственных нужд;
- коммутационных процессов в выключателях;
- взаимодействия с силовыми трансформаторами и линиями электропередачи.

После внедрения КРУЭ абсолютные значения амплитуд всех гармоник существенно снижаются, однако относительная структура спектра сохраняется: 5-я и 7-я гармоники остаются доминирующими. Это указывает на то, что реконструкция прежде всего уменьшает уровень генерации гармоник, а не изменяет их природу.

Снижение уровней 5-й и 7-й гармоник имеет ключевое практическое значение:

- уменьшаются дополнительные потери и нагрев в трансформаторах напряжения и тока;
- повышается точность измерений, используемых в системах РЗА и АСУ ТП;
-
- снижается уровень электромагнитных помех во вторичных цепях, что особенно важно для ЗРУ, размещённого внутри здания;
-
- улучшается устойчивость работы микропроцессорных устройств, чувствительных к искажению формы напряжения.

Высшие гармоники (11-я, 13-я и выше) вносят меньший вклад в THD, однако их снижение также положительно влияет на долговечность изоляции и снижает риск возникновения частичных разрядов.

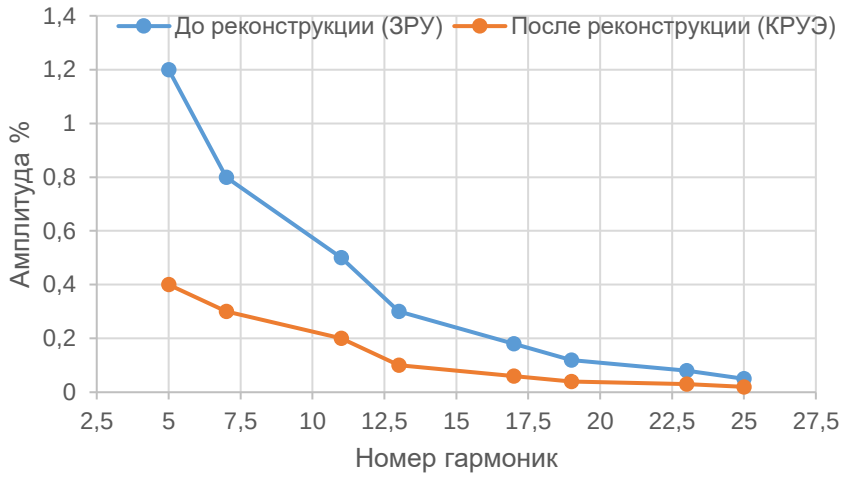


Рисунок 1 – Значения гармонических составляющих напряжения до и после реконструкции ЗРУ 220 кВ

На рисунке 1 наглядно показано изменение спектра гармоник напряжения «до» и «после» реконструкции. Для существующего ЗРУ характерен более “растянутый” спектр с заметными уровнями гармоник вплоть до 25-й. После внедрения КРУЭ спектр становится более компактным, с резким спадом амплитуд высших гармоник.

Графическое сравнение подтверждает выводы расчётов и демонстрирует, что реконструкция приводит не только к снижению суммарного показателя THD_U, но и к качественному улучшению спектрального состава напряжения**.**

Существенное снижение THD_U и амплитуд отдельных гармоник является прямым следствием:

- более стабильных коммутационных процессов в элегазовых выключателях;
- снижения повторных зажиганий дуги;
- экранирующего эффекта металлических оболочек КРУЭ;
- улучшенной электромагнитной совместимости вторичных цепей.

Это подтверждает целесообразность выбора КРУЭ для реконструкции ЗРУ 220 кВ Колымской ГЭС не только с точки зрения электрической и механической стойкости, но и с позиции обеспечения требуемого уровня качества электроэнергии.

Проведённое сравнение показало, что внедрение КРУЭ обеспечивает снижение суммарного коэффициента гармонических искажений напряжения примерно на 65 %, при этом наибольший вклад в улучшение показателей даёт уменьшение 5-й и 7-й гармоник. Данное улучшение имеет принципиальное значение для надёжной эксплуатации ЗРУ 220 кВ, размещённого внутри

здания, и повышает устойчивость работы как силового, так и вторичного оборудования.

5. Подбор оборудования КРУЭ российского производства.

5.1 Общие принципы и критерии выбора оборудования.

Подбор оборудования КРУЭ для реконструкции ЗРУ 220 кВ Колымской ГЭС выполняется на основе следующих критериев:

1) Электрические параметры (по расчётам режимов):

- номинальное напряжение U=220 кВ;
- номинальный длительный ток шин и присоединений I_{n} (по расчёту тока выдачи мощности и ремонтных режимов);
- ток отключения выключателей не ниже расчётного тока КЗ (в работе принят уровень 40 кА);
- термическая стойкость и электродинамическая стойкость с запасом относительно $I_{\text{кз}}$ и $I_{\text{уд}}$

2) Компоновочные ограничения объекта:

- размещение ЗРУ внутри помещения здания, расположенного на крыше административного корпуса;
- ограниченные габариты и требования к компактности;
- необходимость обеспечения безопасных проходов, зон обслуживания и эвакуационных путей.

3) Условия эксплуатации (климат/сейсмика):

- температурные факторы (характерные для района эксплуатации);
- требования к сейсмостойкости (для регионов повышенной сейсмичности — не ниже 8–9 баллов по проекту);
- устойчивость к вибрациям и динамическим нагрузкам.

4) ЭМС, безопасность и мониторинг состояния:

- металлические оболочки КРУЭ как элемент экранирования;
- контроль давления элегаза, состояния приводов, количества коммутаций;
- возможность подключения к АСУ ТП и системе мониторинга качества электроэнергии.

5) Импортозамещение и жизненный цикл:

- приоритет оборудования российского производства;
- наличие сервисной поддержки, запчастей и регламентов;
- подтверждённый опыт применения на объектах электроэнергетики.

5.2 Определение требуемых классов токов и стойкости.

На основании расчётов:

- $I_{кз}$≈35,3 кА ⇒ выбирается выключатель с $I_{кз}$=40 кА;
- $I_{уд}$≈90 кА ⇒ требуется механическая стойкость шинных модулей КРУЭ по паспорту не ниже данного уровня;
- при снижении времени отключения до t=0,6 с уменьшается тепловая нагрузка I^2t, повышается ресурс контактных соединений.

По току выдачи мощности (расчёт $I_{ном}$ по мощности):

- при диапазоне выдачи 200–500 МВт получаются токи порядка 0,55–1,38 кА, что позволяет выбирать шинные системы класса 3150 А с большим запасом либо 4000 А при жёстких ремонтных схемах.

5.3 Функциональная структура КРУЭ 220 кВ для ЗРУ Колымской ГЭС при схеме 3/2.

В ЗРУ 220 кВ Колымской ГЭС реализована схема 3/2 с двумя системами шин:

- ШС-1 — система шин №1 (газоизолированная),
- ШС-2 — система шин №2 (газоизолированная).
- Всего предусмотрено 7 ячеек, из которых:
- 6 выключательных ячеек (в каждой установлен выключатель),
- 1 измерительная ячейка, предназначенная для трансформатора(ов) напряжения (ТН) контроля напряжения на шинах.

Таким образом, измерение напряжения в узле выполняется централизованно через отдельную ячейку ТН, а коммутация присоединений обеспечивается шестью выключательными ячейками.

5.4 Реализация схемы 3/2 (2 присоединения на 3 выключателя).

Схема 3/2 формируется группированием присоединений парами на каждые 2 присоединения приходится 3 выключателя, при этом средний выключатель является общим для двух присоединений.

Для типового узла 3/2 структура выглядит так:

- присоединение А включено между выключателями Q1 и Q2,
- присоединение В включено между выключателями Q2 и Q3,
- выключатель Q2 является общим.

При наличии двух систем шин каждая ветвь присоединения может быть переключена на ШС-1 или ШС-2 посредством встроенных в КРУЭ шинных разъединителей (или их функциональных аналогов в модульной структуре ГИС).

5.5 Роль измерительной ячейки ТН в схеме 3/2.

Измерительная ячейка ТН выполняет функции:

- контроля и регистрации напряжения на шинах 220 кВ (ШС-1/ШС-2),
- обеспечения входных сигналов для РЗА, АСУ ТП и приборов контроля качества электроэнергии (THD, гармоники),

- резервирования измерений по напряжению (по проекту возможно выполнение: ТН на ШС-1 и ТН на ШС-2).

Преимущество отдельной ячейки ТН минимизация количества ТН на присоединениях, упрощение обслуживания и повышение согласованности измерений по напряжению для всего узла.

Сводная спецификация оборудования.

Таблица 6 – Ведомость основного оборудования КРУЭ 220 кВ бакового типа (пример спецификации, РФ).

№	Наименование оборудования	Производитель (РФ)	Пример изделия/серии	Основные параметры для задания (типовые)
1	КРУЭ 220 кВ бакового типа (комплект модулей)	РФ-производитель КРУЭ	КРУЭ-220 (комплект поставки)	класс 245 кВ, 50 Гц, SF_6
2	Выключатель 220 кВ (SF_6), баковый модуль	в составе КРУЭ (РФ)	модуль Q 220 кВ	Iоткл 40 кА; In 3150 А (или 4000 А); Idyn ≥ расчётного
3	Шинные модули ШС-1	в составе КРУЭ (РФ)	шинные секции	In 3150/4000 А
4	Шинные модули ШС-2	в составе КРУЭ (РФ)	шинные секции	In 3150/4000 А
5	Линейные вводы/оконцеватели 220 кВ (для ВЛ)	РФ (вводы)	вводы для КРУЭ 220 кВ	класс 245 кВ
6	ОПН 220 кВ (линейный)	РФ-производитель	ОПН-220	уровень защиты по проекту
7	Трансформатор напряжения 220 кВ (ТН)	РФ-производитель	ТН 220 кВ	классы точности по проекту
8	Разъединители на цепи ТН (в ячейке ТН)	в составе КРУЭ (РФ)	модуль разъединителя	блокировки/индикация
9	Заземляющие ножи (для ТН/линий, по проекту)	в составе КРУЭ (РФ)	модуль ЗР	блокировки
10	Трансформаторы тока 220 кВ (на линейных присоединениях)	РФ-производитель	ТТ 220 кВ	0,2S/5P (пример)
11	Шкафы местного управления (LCC)	в составе КРУЭ (РФ)	шкаф LCC	управление/сигнализация/диагностика
12	Система контроля SF_6 (плотность/давление, сигнализация)	в составе КРУЭ	датчики/панель	контроль отсеков SF_6

№	Наименование оборудования	Производитель (РФ)	Пример изделия/серии	Основные параметры для задания (типовые)
13	МП РЗА линий 220 кВ	РФ	шкаф РЗА линии	ДЗ (Z1–Z3), ТО, МТЗ, УРОВ, АПВ
14	Дифференциальная защита шин (ДЗШ)	РФ	шкаф ДЗШ	защита двух шин
15	АСУ ТП/телемеханика узла 220 кВ	РФ	RTU/SCADA	протоколы по проекту
16	Прибор контроля качества ЭЭ (PQ)	РФ	анализатор PQ	THD, гармоники до 50-й

5.6 Требования к комплектности и системе мониторинга КРУЭ

Для повышения надёжности и сокращения эксплуатационных затрат рекомендуется включить в состав КРУЭ:

- датчики давления SF_6 по отсекам;
- систему сигнализации утечек и порогов давления;
- счётчики коммутационных операций выключателей;
- контроль времени включения/отключения привода;
- возможность теплового контроля (термометки/оптоволоконные датчики — по проекту);
- регистрацию аварийных событий (осциллографирование) в РЗА;
- приборы контроля качества электроэнергии (PQ) с записью гармоник.

Это особенно актуально для ЗРУ внутри здания на крыше АБК: любое ухудшение режима эксплуатации должно фиксироваться системой диагностики заранее, чтобы минимизировать риски аварий и длительных ремонтов.

Таким образом, расширенный подбор оборудования КРУЭ российского производства показывает, что переход на КРУЭ 220 кВ позволяет одновременно решить задачи компоновки (размещение внутри помещения на крыше АБК), обеспечить стойкость к аварийным режимам (токи КЗ и ударные токи), повысить надёжность и снизить гармонические искажения напряжения, а также обеспечить современный уровень автоматизации и диагностического контроля.

Список литературы:

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. — СПб. : Издательство ДЕАН, 2015. — 704 с. — URL: https://pue-7.ru/pue_7.pdf (дата обращения: 02.09.2025). —— Официальный текст ПУЭ-7 в актуальной редакции.

2. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М. : Стандартинформ, 2014. — URL:

https://docs.cntd.ru/document/1200104301 (дата обращения: 12.09.2025). —— Действующий национальный стандарт РФ.

3. ГОСТ 33073–2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ, 2019. — URL: https://allgosts.ru/29/130/gost_33073-2014 (дата обращения: 22.09.2025).

4. СО 153-34.20.501-2003. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. — М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2004. — URL: https://sudact.ru/law/so-153-34.20.501-2003/ (дата обращения: 02.10.2025).

5. СО 34.20.808–2005. Методические указания по расчёту токов короткого замыкания в электроустановках. — URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293799/4293799840.pdf (дата обращения: 12.10.2025).

6. IEC 61000-4-7:2002+AMD1:2008 CSV. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-7: Testing and measurement techniques. General guide on harmonics and interharmonics measurements. — Geneva : IEC, 2009. — URL: https://webstore.iec.ch/publication/4191 (дата обращения: 22.10.2025). ——

7. IEC 62271-203:2022. High-voltage switchgear and controlgear. Part 203: AC gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV. — Geneva : IEC, 2022. — URL: https://webstore.iec.ch/publication/31153 (дата обращения: 01.11.2025).

8. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2012. – 376 с. : ил. ISBN 978-5-4248-0049-8

9. Герасименко А. А., Поликарпова Т. И. Качество электрической энергии в электрических сетях : [Учеб. пособие] / А.А. Герасименко, Т.И. Поликарпова; М-во образования Рос. Федерации, Краснояр. гос. техн. ун-т. - Красноярск : КГТУ, 2002. - 116 с. : ил. ; 20 см. - Библиогр.: с. 104-106 (38 назв.) и в прил.

10. **Андреев В. А.** Релейная защита и автоматика систем электроснабжения : учебник для вузов / Андреев В. А. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 2006. - 639 с. - Библиогр.: с. 625-634. - ISBN 5-06-004826-8.

11. Технические каталоги и эксплуатационная документация на КРУЭ 220 кВ бакового типа российского производства (АО «Электроаппарат», АО «Электрозавод»). URL: https://www.electroapparat.ru/production/krue (дата обращения: 11.12.2025).

12. Проектные и эксплуатационные материалы по реконструкции ЗРУ 220 кВ Колымской ГЭС. Архивные материалы эксплуатирующей организации. (дата обращения: 21.12.2025).

УДК 004.42; 004.438

Новиков М. Д.
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДГОТОВКА ТЕСТОВ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММ

Аннотация: описывается программный продукт, автоматизирующий подготовку исходной информации для трёх систем, предназначенных для тестирования программ, выполняемых студентами факультета ВМК МГУ в рамках практикума на ЭВМ. Даются основные характеристики данного программного продукта, его возможности и особенности использования. Приводится иллюстративный пример.
Ключевые слова: тестирующие системы, программирование, язык Си, язык Паскаль, язык Ассемблера, тестирование программ.

Введение.

На факультете ВМК с 2017 года разрабатываются системы, позволяющие тестировать программы, выполняемые студентами первого курса в рамках практикума на ЭВМ [1], [2], [3]. Всего разработаны три системы – для программ на Паскале, Ассемблере и Си, соответственно. В них используются, соответственно, трансляторы Free Pascal 2.6.4, Masm 6.14 и Gcc. Системы позволяют тестировать студенческие программы в автоматическом режиме, сравнивая результаты, выдаваемые программами, с эталонными ответами, заранее встроенными в соответствующую систему тестирования. Некоторым недостатком тестирующих систем является то, что тесты и остальную необходимую информацию необходимо набирать вручную, что предполагает знание специального языка тестов, разработанного автором. Учитывая разнообразие задач и сложность тестов, этот процесс зачастую представляет собой непростую задачу. Поэтому на факультете ВМК начата разработка специальной программы, позволяющей автоматизировать процесс задания информации для тестирующих систем.

Исходная информация для тестирующих систем.

Для каждой тестируемой программы на языке Паскаль, Ассемблер или Си необходимо задать следующую информацию.

1. Текст (формулировка) задачи [4], [5], [6].

2. Требования, предъявляемые к программе [7].

3. Тестируемая программная единица – полная программа, фрагмент программы или программа с входящей в неё подпрограммой [7].

3. Количество тестов.

4. Тип результата – вещественный, целый, логический или символьный (строковый). От типа результата зависит алгоритм проверки правильности ответа – например, числа 12.0 и 12E0 считаются равными, а строки ’12.0’ и ‘12E0’ – различными.

5. Особенности правильных ответов. Для некоторых задач в случае неверных исходных данных программа должна выдавать слово ‘Ошибка’, что считается правильным ответом. Для некоторых задач (например, для задачи нахождения корней уравнения) результирующие данные могут быть выведены в любом порядке и т.д.

6. В случае, когда исходные и/или результирующие данные представляют собой один или несколько одномерных или двумерных массивов, должны быть заданы размеры массивов [1].

7. В случае тестирования фрагмента программы тестирующей системе необходимо задать операторы (команды), дополняющие его до полной программы. Кроме того, к фрагментам программ, представляющим собой процедуру или функцию, предъявляются дополнительные требования: они не должны содержать внешних объектов, процедуры на Ассемблере должны удовлетворять стандартным соглашениям о связях [8] и т.д.

8. Тесты к задачам – совокупность входных и результирующих данных.

В качестве примера задачу 11.15 из [5]. Требуется составить процедуру на языке Ассемблера, вычисляющую сумму элементов массива из байтов со знаком. Параметры – адрес массива, количество элементов в нём и адрес переменной размером в двойное слово, куда заносится сумма, передаются процедуре через стек.

Текст процедуры имеет вид (подробное описание используемой версии языка Ассемблера см., например, в [9], глава 6):

```
sumproc uses ecx ebx edx edi X:dword, N:Dword, S:Dword
mov edi,X
mov ecx,N
mov edx,S
mov [edx],dword ptr 0
L:movsx ebx,byte ptr [ecx][edi]-1
add [edx],ebx
loop L
 ret
sum endp
```

Системе, тестирующей эту процедуру, необходимо задать всю изложенную выше в п.п. 1 - 8 информацию. Записываемый в базу данных текст (на языке тестов), выглядит следующим образом.

```
_11_15;
Loop 1
```

В программе необходимо использовать ровно одну команду Loop.

4 i procedure

include console.inc @ .data @ Q! dd 0 @ N!=0 @ X! db N! dup(?) @ S! DD ? @.code

Start: @ mov ecx,N! @ mov ebx,0 @ <0>:inint X![ebx] @ inc ebx @ dec ecx @ jnz <0> @ k!=! @ for R,<ecx ,eax ,ebx ,ebp ,edx ,edi ,esi> @ k!=k!+1 @ mov

R,k! @ endm @ pushad @ mov Q!,esp @ push offset S! @ push N! @ push offset X! @call <name> @ outintln S! @ cmp Q!,esp @ je <3>@ outchar 6 @ popad @ exit @ <3>:@ <1>=32 @<1>=32 @ for R,<eax, ecx, edx, ebx, esp, ebp, esi, edi> @ <1>=<1>-4 @ ifdif <R>,<esp> @ cmp R,[esp+<1>] @ jnz <2>@ else @ mov ebx,[esp+12] @ sub ebx, 32 @ cmp ebx , esp @ jnz <2> @ endif @ endm @ popad @ exit @ <2>:outchar 5 @ popad @ exit @ end Start

5 7 10 15
-2 -4 -6 -8 -10
-30
100 100 100 100 -100 -100 100
300
20 10 30 40 -50 -70 -80 -90 100 -60
-150
1 -2 3 -4 5 -6 7 -8 9 -10 11 -12 13 -14 15
8

Эта информация включает в себя имя задачи, требование использовать команду Loop, количество тестов (4), тип результата (integer), указание на то, что это процедура (не полная программа). Далее следует текст, вставляемый в формируемую полную программу перед процедурой и текст, вставляемый в формируемую полную программу после процедуры. Слово <name> в тексте заменяется на фактическое имя процедуры. Много места занимает проверка сохранения значений регистров в процедуре – необходимо присвоить всем регистрам случайное начальное значение, а по окончании работы процедуры проверять совпадение текущего значения с начальным. Для компактности команды ассемблера записываются в строку и разделяются символом ‘@’. Вывод символа с кодом 6 означает неверное значение регистра esp после выхода из процедуры, вывод символа с кодом 5 означает неверное значение какого-либо другого регистра. При наличии в результирующей строке символов с данными кодами система тестирования выдаёт сообщение об ошибке. Восклицательный знак при трансляции команд заменяется случайной цифрой, что исключает использование в процедуре внешних переменных (имена всех внешних переменных случайны). Цифры в уголках также заменяются на случайные имена.

Далее следуют размеры массива – 4 числа. При наличии массива его длина должна быть задана константой; тестирующая система создаёт и тестирует 4 копии программы с разными значениями константы. Затем следует набор тестов.

Как видно, составление такого текста требует специальных знаний.

Описание системы подготовки тестов.

На факультете ВМК МГУ в 2025 году начата разработка программного продукта, автоматизирующего процесс подготовки тестов для всех трёх систем автоматического тестирования. При запуске программы на

выполнение предлагается выбрать одну из трёх систем тестирования (т.е. соответствующий язык программирования) и каталог для хранения информации для выбранной тестирующей системы. Далее можно вводить тесты к новым задачам, редактировать тесты к существующим задачам и удалять задачи.

Основной кадр системы подготовки тестов зависит от выбранного языка программирования и от тестируемой программной единицы (программа, подпрограмма или программа с входящей в неё подпрограммой). В нём находятся поля для ввода всей необходимой информации для тестирующей системы.

Для приведённого выше примера тестирования процедуры нахождения суммы элементов массива этот кадр имеет вид:

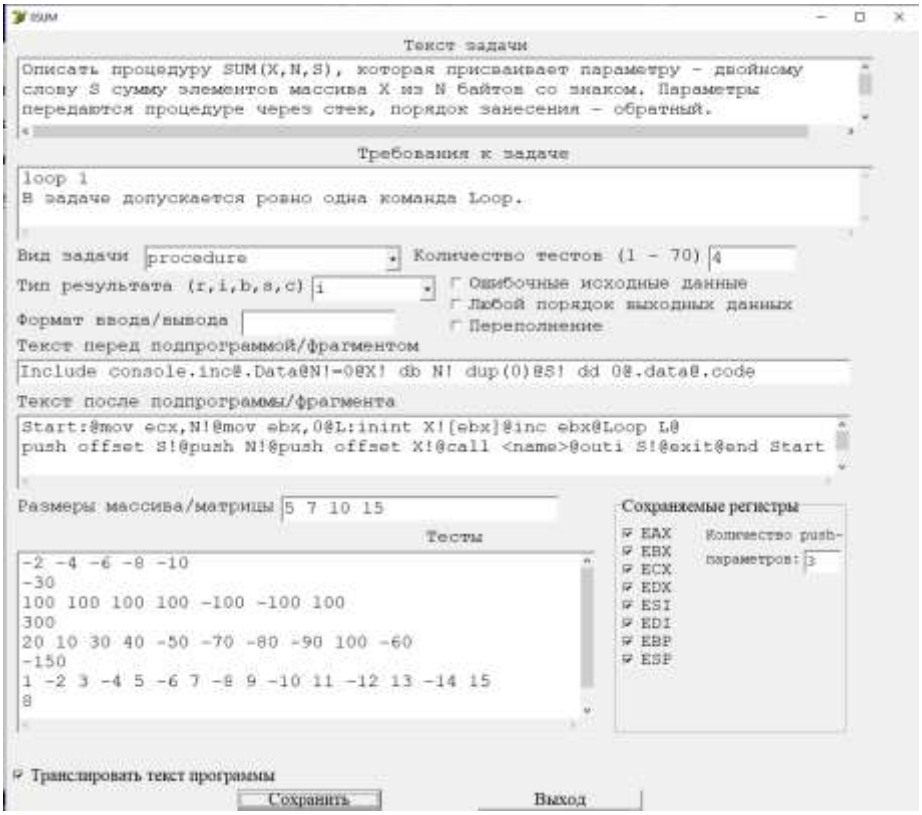


Рис.1. Основной кадр системы подготовки тестов

Мы видим, что вся информация для тестирующей системы записана в простом и наглядном виде. Имеется встроенная система подсказок (help). При занесении информации в базу данных тестирующей системы формируется текст, эквивалентный приведённому выше. Дополнительно выполняется предварительная трансляция команд, вставляемых до и после тестируемой процедуры с целью выявления случайных ошибок при наборе.

Система подготовки тестов написана в среде Delphi. Она может выполняться в среде Windows на любом компьютере и не требует выхода в интернет.

Результаты были доложены на конференции «Ломоносовские чтения» в 2026 году [10].

Использование и перспективы развития системы подготовки тестов.

Описанную систему подготовки тестов предполагается использовать для создания тестов к новым задачам, которые планируется использовать в практикуме студентов факультета ВМК. В ближайшее время планируется переход на новую, 64-битную версию языка Ассемблера вместо используемой в настоящее время 32-битной версии Masm 6.14. Планируется также замена языка Паскаль на язык Си. Учитывая независимость языка тестов от языка программирования и схожесть тестирования программ на разных языках, будет несложно адаптировать данную систему подготовки тестов к новым условиям. Планируется также реализовать возможности, к настоящему времени реализованные в системах тестирования, но не реализованные в системе подготовки тестов. Наиболее важные из них - проверка правильности работы с динамической памятью [11] и проверка закрытия файлов по окончании выполнения процедуры или функции [7]. Это означает, система подготовки тестов будет автоматически дополнять тексты, вставляемые в программу до и после тестируемой подпрограммы специальными командами по аналогии с тем, как это сделано для проверки сохранения значений регистров в процедуре. Возможна также реализация более сложной проверки правильности решения – задание специальной программы, выполняющей такую проверку. Например, в задаче построения деревьев ([4], глава 17) правильные деревья могут быть различны по своей структуре, разные правильные ответы допустимы также для многих задач главы 18 из [4].

Список литературы:

1. Новиков М.Д. Системы автоматического тестирования программ. // Журнал «Аллея науки». Том 4. №103, 2025, с 1-8.
2. Новиков М.Д. Программное обеспечение поддержки практикума на младших курсах факультета ВМК. // Сборник «Ломоносовские чтения-2024». Научная конференция. Факультет ВМК МГУ. Тезисы докладов. Серия «Вычислительная математика и кибернетика». Издательство «МАКС Пресс» (Москва), тезисы. С.186-187.
3. Новиков М.Д. Система автоматического тестирования программ на языке Си. // Сборник «Ломоносовские чтения-2025». Научная конференция. Факультет ВМК МГУ. Тезисы докладов. Серия «Вычислительная математика и кибернетика». Издательство «МАКС Пресс» (Москва), тезисы. С.181-182.
4. Язык Паскаль: упражнения и задачи : [Учеб. пособие] / В. Н. Пильщиков. - Москва : Науч. мир, 2003. - 223 с. : ил.; 23 см.; ISBN 589176220X
5. Бордаченкова Е.А. Задачи и упражнения по языку ассемблера MASM. Учебное пособие для студентов I курса. //М.: Издательство Московского университета. 2023. 112 с.
6. Руденко Т.В. Сборник задач и упражнений по языку Си. Учебное пособие для студентов II курса. //М.: Издательский отдел факультета ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова. 1999. 80 с.

7. Новиков М.Д. Автоматическое тестирование студенческих программ. //Сборник Всесоюзная научная конференция «Математические основы информатики и информационно-телекоммуникационных систем». Сборник трудов. Изд-во Тверской государственный университет (Тверь), 2021. С. 235 – 240.

8. Новиков М.Д. Автоматическое тестирование процедур на языке Ассемблера. //Журнал «Международный журнал гуманитарных и естественных наук». №3-2 (66). 2022. С. 144-147

9. Введение в архитектуру ЭВМ и системы программирования : учебно-методическое пособие / В. Г. Баула ; Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, Фак. вычислительной математики и кибернетики. - Москва : МАКС Пресс, 2007. - 363 с. : ил., табл.; 20 см.; ISBN 978-5-89407-307-1 URL: http://arch64.cs.msu.su (дата обращения – 20.03.2026).

10. Новиков М.Д. Автоматизация подготовки тестов для систем тестирования задач практикума. //Сборник «Ломоносовские чтения-2026». Научная конференция. Факультет ВМК МГУ им. М. В. Ломоносова. Тезисы докладов. Серия «Вычислительная математика и кибернетика». С.176-177.

11. Новиков М.Д. Тестирование программ на языке Паскаль, использующих динамическую память. //Журнал «Eastern European Scientific journal». Т.1, №3(67). 2021. С. 45-47.

УДК 691.328

Калита М. И.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

УЧЕТ СТУПЕНЧАТОГО ХАРАКТЕРА НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА

Аннотация: в статье рассматривается проблема учёта ступенчатого (поэтапного) характера нагружения железобетонных конструкций при определении деформаций ползучести бетона. Обосновывается, что традиционные методы расчёта, ориентированные на однократное приложение нагрузки, не учитывают историю нагружения материала. Для корректного описания деформаций предложено использовать принцип суперпозиции (наложения) в рамках линейной наследственной теории ползучести Больцмана в сочетании с нормативной методикой приложения В Еврокода EN 1992-1-1. Выполнен сравнительный численный анализ для колонны многоэтажного здания, возводимого с периодами 7 и 20 суток на этаж. Установлено, что игнорирование ступенчатости нагружения завышает расчётные деформации ползучести более чем на 45 % по сравнению с уточнёнными значениями, полученными с учётом истории приложения нагрузки. Сделан вывод о предпочтительности учета соответствующих поправок в инженерных расчётах для повышения их достоверности, избежания неоправданного увеличения сечений или армирования.

Ключевые слова: ступенчатое нагружение, деформативность железобетонных конструкций, история нагружения, поэтапное возведение зданий, линейная наследственная теория ползучести.

Введение

При эксплуатации железобетонных конструкций бетон подвергается сложным режимам силового воздействия. На практике загружение элементов несущих конструкций происходит поэтапно, что обусловлено технологией строительства, монтажом оборудования или временным складированием материалов (рис.1).

Такой ступенчатый режим нагружения существенно влияет на развитие деформаций ползучести, однако большинство существующих методик ориентировано на простое (однократное) загружение [1]. Пренебрежение этим фактором снижает приближенность результатов расчета к реальному поведению конструкции [2]. В связи с этим возникает необходимость корректировки классических моделей ползучести применительно к реальным условиям работы материала [3]. В настоящей статье рассматриваются подходы, позволяющие учитывать историю нагружения бетона, а также анализируется влияние величины и длительности промежуточных ступеней на конечную деформативность.

Цель работы — обосновать важность внесения поправок в инженерные расчеты для повышения их достоверности и надежности проектируемых конструкций [4].

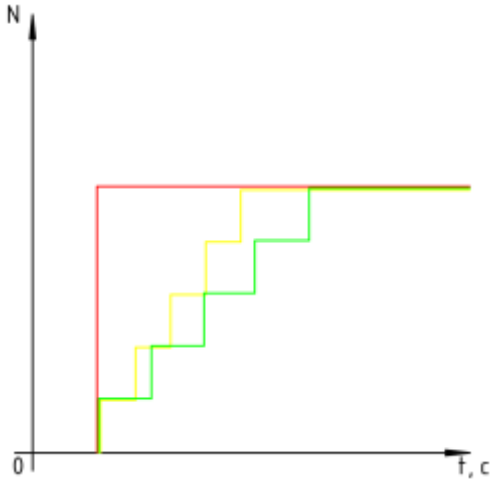


Рис 1. Сравнительный график изменения нагрузки на элемент во времени, идеализированный и варианты реального нарастания

Применяемый метод расчета

Для определения деформаций ползучести бетона в условиях поэтапного возведения конструкций было принято решение проводить расчеты по прил. В EN 1992-1-1 [5], что связано с несколькими причинами.

Прежде всего, помимо общеприменяемых параметров, таких как влажность окружающей среды и класс бетона, данная методика позволяет учесть фактор момента приложения нагрузки (возраст бетона). Данный параметр является ключевым в учете ступенчатости нагрузки. Также данный метод позволяет учесть тип цемента по скорости твердения и крайне низкие/крайне высокие температуры, что расширяет спектр применимости.

Немаловажно, что EN 1992-1-1 является современным общеевропейским стандартом проектирования железобетонных конструкций, и является рекомендованным к использованию во многих странах Евросоюза и СНГ и применяется для сопоставительных расчетов в РФ. Применение Еврокода также обеспечивает совместимость расчета с актуальными программными комплексами.

Подход к выбранной методике

Для решения этой задачи применяется принцип наложения (суперпозиции) деформаций ползучести, который является фундаментальным положением линейной наследственной теории ползучести Больцмана [6].

Согласно этому принципу, полная деформация бетона в любой момент времени при переменном напряжении равна сумме деформаций, вызванных каждым приращением напряжения, как если бы эти приращения прикладывались к ненагруженному образцу и развивались независимо друг от

друга [7]. Иными словами, деформации от каждой ступени нагружения «накладываются» друг на друга (рис. 2).

Применительно к ступенчатому характеру нагружения принцип суперпозиции был применен по нескольким причинам: он позволяет раздельно учитывать вклад каждой ступени нагрузки в общую деформацию ползучести, что особенно важно при поэтапном возведении зданий, монтаже оборудования или временном складировании материалов; принцип корректно отражает тот факт, что бетон с течением времени стареет; также применение данного принципа совместно с нормативными методиками (Приложением В Еврокода 2) обеспечивает инженерную точность, достаточную для практических расчетов.

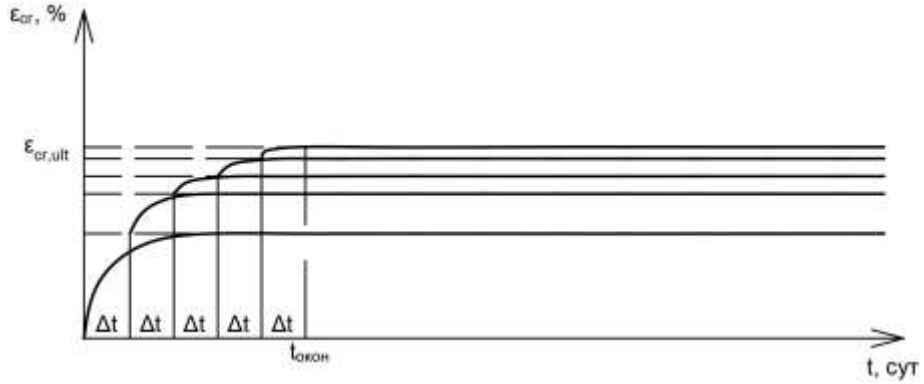


Рис 2. Графическое представление принципа наложения при расчете предельных деформаций

Исходные данные

Для сравнительного анализа зададимся колонной 2 этажа, габаритами 400х800 мм, здания, строящегося в Москве (влажность 71%), выполненной из бетона класса В40 (С30/37).

При возведении каждого нового этажа с периодом 7/20 суток нагрузка на колонну увеличивается на 10 тонн. Для сравнения проведем расчет предельных деформаций при полном загружении в возрасте 7/20 суток суммарной нагрузкой 180 тонн.

Так как рассчитываются предельные деформации ползучести, время окончания нагружения стремится к бесконечности.

$$t \to \infty$$

$$t\text{-}t_0 \to \infty$$

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{t\text{-}t_0}{\beta_H + t\text{-}t_0}\right]^{0,3}$$

$$\lim_{(t\text{-}t_0)\to\infty} \left[\frac{t\text{-}t_0}{\beta_H + t\text{-}t_0}\right]^{0,3} = 1$$

Приведенный размер сечения h_0:

$$h_0=\frac{2A_c}{u}=\frac{2\cdot0,4\cdot0,8}{2(0,4+0,8)}=0,267 \text{ м}$$

Определим коэффициенты α:

$$\alpha_1=\left[\frac{35}{f_{cm}}\right]^{-0,7}=\left[\frac{35}{38}\right]^{-0,7}=1,059$$

$$\alpha_2=\left[\frac{35}{f_{cm}}\right]^{-0,2}=\left[\frac{35}{38}\right]^{-0,2}=1,017$$

$$\alpha_3=\left[\frac{35}{f_{cm}}\right]^{-0,5}=\left[\frac{35}{38}\right]^{-0,5}=1,042$$

Учет относительной влажности и приведенного размера сечения:

$$\beta_H=1,5[1+(0,012RH)^{18}]\cdot h_0+250\cdot\alpha_3\leq1500\cdot\alpha_3$$

$$\beta_H=1,5[1+(0,012\cdot71)^{18}]\cdot267+250\cdot1,042\leq1500\cdot1,042$$

$$\beta_H=673,96\leq1563$$

Коэффициент учета влияния предела прочности на сжатие:

$$\beta(f_{cm})=\frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}}=\frac{16,8}{\sqrt{38}}=2,725$$

Учет влияния относительной влажности:

$$\varphi_{RH}=\left[1+\frac{1-RH/100}{0,1\sqrt[3]{h_0}}\cdot\alpha_1\right]\cdot\alpha_2=\left[1+\frac{1-71/100}{0,1\sqrt[3]{267}}\cdot1,059\right]\cdot1,017=1,017$$

В таблице приведен расчет слагаемых параметров по формулам прил. В и результаты расчета. Пластические деформации без учета ступенчатости получены умножением суммарной упругой деформации на параметры ползучести первого слагаемого.

Таблица 1. Сравнение методов расчета деформаций ползучести.

Нагрузка на колонну	Абс. значение нагрузки	Прираш. нагр.	начало действия нагрузки при периоде	начало действия нагрузки при периоде	β(t0)		φ0		Упругие деф-ции, д. ед.	Пластические деформации при периоде 7 суток , д. ед.	Пластические деформации при периоде 20 суток , д. ед.
	N	N	7 суток	20 суток	7	20	7	20			
От собств. веса 2 этажей	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
"3 этажей	10	10	7	20	0,634609	0,52068	1,638957	1,344722	0,0000082	0,0000135	0,0000111
"4 этажей	20	10	14	40	0,557035	0,456354	1,438613	1,178592	0,0000082	0,0000118	0,0000097
"5 этажей	30	10	21	60	0,515885	0,422309	1,332338	1,090666	0,0000082	0,000011	0,000009
"6 этажей	40	10	28	80	0,48845	0,399641	1,261482	1,032122	0,0000082	0,0000104	0,0000085
"7 этажей	50	10	35	100	0,468128	0,382865	1,208999	0,988797	0,0000082	0,0000099	0,0000081
"8 этажей	60	10	42	120	0,452123	0,369662	1,167665	0,954699	0,0000082	0,0000096	0,0000079
"9 этажей	70	10	49	140	0,439	0,358842	1,133771	0,926755	0,0000082	0,0000093	0,0000076
"10 этажей	80	10	56	160	0,427926	0,349716	1,105172	0,903187	0,0000082	0,0000091	0,0000074
"11 этажей	90	10	63	180	0,41838	0,341853	1,080518	0,882878	0,0000082	0,0000089	0,0000073
"12 этажей	100	10	70	200	0,410014	0,334964	1,058912	0,865085	0,0000082	0,0000087	0,0000071
"13 этажей	110	10	77	220	0,402584	0,328847	1,039723	0,849288	0,0000082	0,0000086	0,000007
"14 этажей	120	10	84	240	0,395913	0,323357	1,022496	0,83511	0,0000082	0,0000084	0,0000069
"15 этажей	130	10	91	260	0,389871	0,318385	1,006891	0,82227	0,0000082	0,0000083	0,0000068
"16 этажей	140	10	98	280	0,384356	0,313848	0,992646	0,810552	0,0000082	0,0000082	0,0000067
"17 этажей	150	10	105	300	0,379288	0,30968	0,979559	0,799789	0,0000082	0,0000081	0,0000066
"18 этажей	160	10	112	320	0,374606	0,30583	0,967467	0,789845	0,0000082	0,000008	0,0000065
"19 этажей	170	10	119	340	0,370259	0,302256	0,956239	0,780614	0,0000082	0,0000079	0,0000064
"20 этажей	180	10	126	360	0,366204	0,298923	0,945768	0,772006	0,0000082	0,0000078	0,0000063
						С учетом ступенчатости			0,000148	0,0001672	0,0001367
						Без учета ступенчатости			0,000148	0,0002426	0,0001991

Заключение

Проведенные расчеты подтвердили, что учет ступенчатого характера нагружения существенно влияет на определение деформаций ползучести бетона. Сравнение двух подходов — с применением принципа суперпозиции (учет истории нагружения) и без него (однократное приложение всей нагрузки) — показало значительные расхождения в результатах.

Для периода возведения одного этажа, равного 7 суткам, деформации ползучести, рассчитанные без учета ступенчатости, превысили уточненные значения на 45,1% (0,0002426 против 0,0001672). При периоде 20 суток превышение составило 45,6% (0,0001991 против 0,0001367). Таким образом, упрощенный подход систематически завышает расчетные деформации более чем на 45% в рассмотренных условиях.

На основании полученных результатов можно рекомендовать при проектировании железобетонных конструкций, возводимых поэтапно, учитывать историю нагружения. Игнорирование этого фактора приводит к неоправданному перерасходу материалов.

Список литературы:

1. Александровский, С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести / С. В. Александровский. — М. : Стройиздат, 1973. — 432 с.
2. Улицкий, И. И. К вопросу о расчете деформаций ползучести бетона при ступенчатом загружении / И. И. Улицкий // Бетон и железобетон. — 1967. — № 5. — С. 21–24.
3. Прокопович, И. Е. Наследственная теория ползучести и ее приложение к расчету бетонных и железобетонных конструкций / И. Е. Прокопович // Бетон и железобетон. — 1963. — № 11. — С. 65–70.
4. Бондаренко, В. М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов. — М. : Стройиздат, 1985. — 286 с.
5. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. — Brussels: CEN, 2004. — 225 p.
6. Работнов, Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю. Н. Работнов. — М. : Наука, 1966. — 752 с.
7. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. — М. : Машиностроение, 1975. — 400 с.

УДК 004.85:616.379-008.64

Санталова Д. Д., Парамонов А. А.
МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

ГИБРИДНАЯ АНСАМБЛЕВАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСКА РАЗВИТИЯ САХАРНОГО ДИАБЕТА 2 ТИПА НА ОСНОВЕ СТЕКИНГА И МНОГОСЛОЙНОГО ПЕРЦЕПТРОНА

Аннотация. Сахарный диабет 2 типа (СД2) является одним из наиболее распространенных хронических заболеваний, при этом раннее выявление лиц с высоким риском развития патологии остается актуальной задачей. В работе предложена гибридная прогностическая модель на основе стекинг-ансамбля, объединяющая восемь базовых алгоритмов с мета-классификатором в виде многослойного перцептрона (MLP). Генерация мета-признаков выполнена с использованием 5-кратной кросс-валидации и балансировки классов Random Oversampling. Экспериментальная оценка на тестовой выборке из 100 000 записей показала, что предложенная модель превосходит лучшую базовую модель по ряду метрик. Реализована стратификация пациентов на три группы риска на основе вероятностного выхода модели: в группе высокого риска доля пациентов с подтвержденным диабетом достигает 90,6%. Разработанная модель может быть интегрирована в медицинские информационные системы для скрининга СД2.

Ключевые слова: сахарный диабет 2 типа, стекинг, ансамблевое обучение, многослойный перцептрон, машинное обучение, прогнозирование риска, группы риска.

Введение

Сахарный диабет (СД) представляет собой хроническое заболевание, характеризующееся нарушением углеводного обмена. По данным Всемирной организации здравоохранения, общее число пациентов с диабетом в мире превысило 463 миллиона человек, причем на сахарный диабет 2 типа (СД2) приходится до 90-95% случаев [1]. В Российской Федерации, по данным Федерального регистра сахарного диабета, на начало 2023 года на диспансерном учете состояло около 5 миллионов пациентов, а реальное число больных может достигать 10,5 миллиона человек [2].

Своевременное выявление лиц с высоким риском развития СД2 позволяет предпринять эффективные профилактические мероприятия. В связи с этим актуальной является задача разработки методов прогнозирования на основе анализа клинико-демографических данных с использованием современных подходов машинного обучения.

Анализ современных исследований показывает, что основное внимание уделяется дифференциальной диагностике сложно классифицируемых форм диабета (LADA, MODY) [3, 4], тогда как прогнозирование риска развития СД2 остается менее изученным с точки зрения применения гибридных ансамблевых методов. В существующих работах применяются либо

классические алгоритмы, либо изолированные нейросетевые архитектуры, однако их комбинация в рамках единой гибридной модели ранее не реализовывалась. Целью настоящей работы является повышение точности и надежности прогнозирования риска развития СД2 за счет разработки гибридной ансамблевой модели на основе стекинг-ансамбля с мета-классификатором в виде многослойного перцептрона.

Материалы и методы

Характеристика данных. В исследовании использован открытый набор данных Diabetes Clinical Dataset [5], содержащий 100 000 записей и 17 признаков. После удаления текстового поля clinical_notes размерность составила 100 000 строк и 15 признаков, включающих: возраст, пол, индекс массы тела (ИМТ), уровень глюкозы, уровень HbA1c, наличие гипертонии, сердечно-сосудистых заболеваний, статус курения, местоположение и расовую принадлежность. Целевая переменная — бинарный диагноз диабета. Выявлен значительный дисбаланс классов: 91,5% здоровых пациентов и 8,5% пациентов с диабетом.

Предобработка данных. Для числовых признаков выполнена обработка выбросов методом межквартильного размаха с заменой экстремальных значений на медиану. Категориальные переменные преобразованы методом One-Hot Encoding. Числовые признаки масштабированы с использованием StandardScaler. Выборка разделена на обучающую (70%), валидационную (15%) и тестовую (15%) со стратификацией.

Балансировка классов. На основе сравнительного анализа методов балансировки (SMOTE, ADASYN, Random Oversampling, Random Undersampling) выбран Random Oversampling как обеспечивающий наилучшее значение F1.5 (0,6659 против 0,6517 без балансировки). Балансировка применялась исключительно к обучающей части каждого фолда кросс-валидации для предотвращения утечки данных.

Архитектура гибридной модели. Предложена двухуровневая архитектура стекинг-ансамбля. На первом уровне используются восемь базовых моделей: три конфигурации Random Forest, две реализации LightGBM, XGBoost, CatBoost и логистическая регрессия. Гиперпараметры каждой модели подобраны методом Randomized Search с 5-кратной кросс-валидацией по метрике F1.5. На втором уровне в качестве мета-классификатора выбран многослойный перцептрон (MLP) с архитектурой: входной слой (40 нейронов), первый скрытый слой (100 нейронов, ReLU), второй скрытый слой (50 нейронов, ReLU), выходной слой (2 нейрона, softmax).

Генерация мета-признаков. Для предотвращения переобучения генерация мета-признаков для обучающей выборки выполнялась с использованием 5-кратной кросс-валидации. Для каждой из восьми базовых моделей формировалось пять мета-признаков: вероятности классов, бинарное

предсказание с индивидуальным порогом (оптимизированным по F1.5 на валидации), логарифм отношения шансов и уверенность модели. Общее количество мета-признаков составило 40.

Метрики оценки. Качество моделей оценивалось по метрикам: Accuracy, Precision, Recall, F1-score, F1.5 (с β=1,5, что соответствует приоритету полноты над точностью в медицинской задаче скрининга) и ROC-AUC.

Результаты

Сравнительный анализ качества моделей. На тестовой выборке проведено сравнение предложенной гибридной модели с лучшей базовой моделью (Random Forest). Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение метрик качества базовой и гибридной моделей

Модель	Accuracy	Precision	Recall	F1	F1.5	ROC-AUC
Base Model (Random Forest)	0,9097	0,4807	0,7804	0,5949	0,6548	0,9510
Stacking Model (MLP)	0,9353	0,5942	0,7522	0,6639	0,6953	0,9655

Предложенная гибридная модель превосходит лучшую базовую модель по всем метрикам. Повышение Precision на 11,35 процентных пункта (с 0,4807 до 0,5942) и F1.5 на 4,05 п.п. (с 0,6548 до 0,6953) свидетельствует о более сбалансированной работе ансамбля. ROC-кривые, иллюстрирующие дискриминативную способность моделей, представлены на рисунке 1.

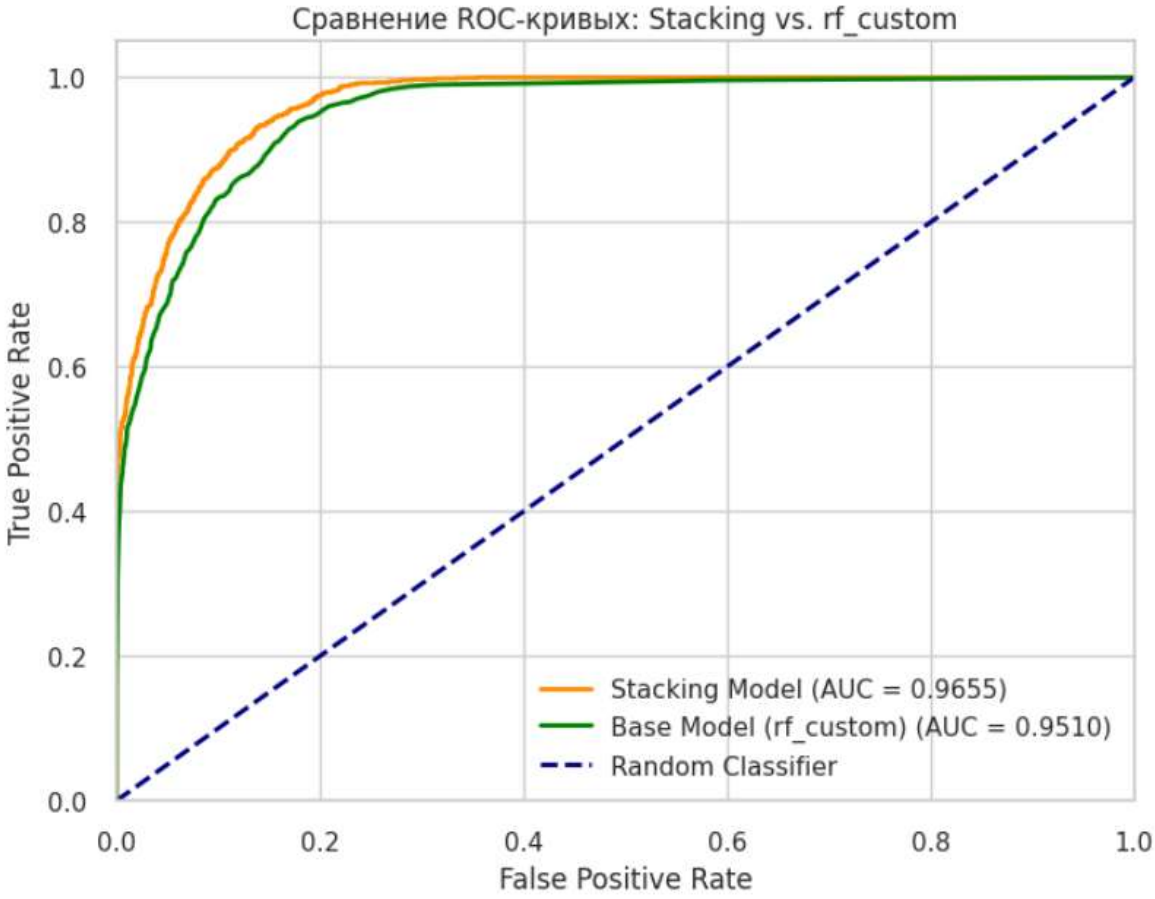


Рисунок 1. ROC-кривые базовой (rf_custom) и гибридной (Stacking Model) моделей

Значение ROC-AUC для гибридной модели составило 0,9655, что превышает показатель базовой модели (0,9510). Увеличение площади под кривой на 0,0145 подтверждает улучшение способности модели различать пациентов с диабетом и без него.

Стратификация групп риска на основе вероятности. Для практического применения разработана стратификация пациентов на три группы риска на основе вероятностного выхода модели: низкий риск (вероятность <33%), средний риск (33–67%), высокий риск (>67%). Распределение пациентов по группам и результаты прогноза представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Распределение по вероятностным группам риска

Группа риска	**Доля пациентов, %**	**Диабет есть (верный прогноз), %**	**Диабета нет (ложноположительный прогноз), %**
Низкий	91,9	3,55	96,45
Средний	3,7	32,16	67,84

Група риска	**Доля пациентов, %**	**Диабет есть (верный прогноз), %**	**Диабета нет (ложноположительный прогноз), %**
Высокий	4,5	90,62	9,38

В группе высокого риска доля пациентов с подтвержденным диабетом составляет 90,6%, что в 10,7 раза выше, чем в среднем по выборке (8,5%). Оставшиеся 9,4% пациентов в этой группе, не имеющие диабета на момент обследования, с высокой вероятностью находятся в состоянии преддиабета или имеют множественные факторы риска.

Обсуждение

Разработанная гибридная модель демонстрирует устойчивое превосходство над лучшей базовой моделью, что подтверждает эффективность стекинг-ансамбля с нейросетевым мета-классификатором. Применение Random Oversampling внутри фолдов кросс-валидации обеспечило устойчивость модели к дисбалансу классов.

Особого внимания заслуживает вероятностная стратификация риска. В отличие от многих существующих подходов, дающих бинарный прогноз, предложенная модель предоставляет непрерывную вероятностную оценку, что позволяет врачу гибко настраивать порог принятия решения в зависимости от клинической ситуации. Высокая концентрация больных в группе высокого риска (90,6%) делает модель эффективным инструментом первичного скрининга.

Клиническая интерпретация группы высокого риска. Особую клиническую ценность представляет группа высокого риска, в которой 90,6% пациентов имеют подтвержденный диагноз СД2. Оставшиеся 9,4% пациентов в этой группе, не имеющие диабета на момент обследования, с высокой вероятностью находятся в состоянии преддиабета или имеют множественные факторы риска, что делает рекомендацию по углубленному обследованию для них клинически обоснованной. Таким образом, модель не только выявляет уже заболевших, но и идентифицирует лиц, требующих первичной профилактики. Даже ложноположительные срабатывания в группе высокого риска не являются «ошибкой» в медицинском смысле — эти пациенты получают обоснованный сигнал для визита к врачу и коррекции образа жизни.

Разработанная модель может быть интегрирована в медицинские информационные системы в качестве инструмента поддержки принятия врачебных решений. Возможность стратификации пациентов на три группы риска позволяет оптимизировать тактику ведения: для группы низкого риска — стандартные профилактические мероприятия, для группы среднего риска — углубленное обследование, для группы высокого риска — активное диспансерное наблюдение и раннее начало терапии.

Ограничения исследования включают: использование только одномоментных данных (без учета динамики признаков), исключение текстовых заметок из анализа, а также необходимость дополнительной валидации модели на независимых выборках.

Заключение

В работе разработана и экспериментально апробирована гибридная прогностическая модель оценки риска развития сахарного диабета 2 типа на основе стекинг-ансамбля из восьми базовых алгоритмов и мета-классификатора в виде многослойного перцептрона. Предложенная модель превосходит лучшую базовую модель по Accuracy (0,9353 против 0,9097), Precision (0,5942 против 0,4807), F1 (0,6639 против 0,5949), F1.5 (0,6953 против 0,6548) и ROC-AUC (0,9655 против 0,9510). Реализована стратификация пациентов на три группы риска на основе вероятностного выхода модели: в группе высокого риска доля пациентов с диабетом достигает 90,6%, а оставшиеся 9,4% получают клинически обоснованный сигнал для профилактического обследования. Разработанная модель может быть рекомендована к использованию в системах поддержки принятия врачебных решений для раннего выявления лиц с высоким риском развития СД2.

Список литературы:

1. Всемирная организация здравоохранения. Диабет. Информационный бюллетень. 2022. [Электронный ресурс]. URL: https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/diabetes (дата обращения: 10.04.2026).
2. Дедов И.И., Шестакова М.В., Викулова О.К. и др. Сахарный диабет в Российской Федерации: динамика эпидемиологических показателей по данным Федерального регистра сахарного диабета за период 2010–2022 гг. // Сахарный диабет. 2023. Т. 26. № 2. С. 104-117.
3. Русяева Н.В., Голодников И.И., Никонова Т.В. и др. Методы машинного обучения в дифференциальной диагностике сложно классифицируемых типов сахарного диабета // Сахарный диабет. 2023. Т. 26. № 5. С. 473-483.
4. Сечко Е.А., Лаптев Д.Н., Романенкова Е.М. и др. Модель клинического прогнозирования сахарного диабета MODY типа у детей // Сахарный диабет. 2024. Т. 27. № 1. С. 33-40.
5. Diabetes Clinical Dataset. Kaggle. 2025. [Электронный ресурс]. URL: https://www.kaggle.com/datasets/ziya07/diabetes-clinical-dataset100k-rows/data (дата обращения: 10.04.2026).
6. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45. No. 1. P. 5-32.
7. Wolpert D.H. Stacked generalization // Neural Networks. 1992. Vol. 5. No. 2. P. 241-259.

УДК 656.7.072

Лисенков Р. А.
Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ВХОДЯЩЕГО ПОТОКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В УЗЛОВОМ АЭРОПОРТУ: ОТ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПУАССОНОВСКОГО ПРОЦЕССА К ММРР С НЕЧЁТКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Аннотация. В статье выполнен сравнительный анализ моделей входящего потока воздушных судов в узловом аэропорту, применяемых в задачах планирования ресурсов наземного обслуживания. Систематизированы допущения классических пуассоновских и нестационарных пуассоновских моделей, применявшихся в работах ряда отечественных исследователей, и обоснована их несостоятельность для описания волнового хабового трафика. На основе эмпирических наблюдений сверхдисперсии и положительной автокорреляции приращений доказана необходимость перехода к более общему классу марковских процессов прибытий. Обоснован выбор марковски модулированного пуассоновского процесса с нечёткими параметрами интенсивности в качестве базовой модели, обеспечивающей адекватное воспроизведение кластеризации рейсов и неопределённости расписания при последующей робастной имитационно-оптимизационной настройке ресурсного обеспечения.

Ключевые слова: входящий поток воздушных судов, узловой аэропорт, наземное обслуживание, нестационарный пуассоновский процесс, марковски модулированный пуассоновский процесс, нечёткие параметры, сверхдисперсия, волновой трафик.

Введение

Эффективность работы узлового аэропорта во многом определяется качеством оперативного управления процессами наземного обслуживания воздушных судов (далее - ВС), поскольку именно на этапе подготовки рейса к вылету реализуются ключевые временные нормативы, заложенные эксплуатантом и закреплённые в эксплуатационной документации. Воздушный кодекс Российской Федерации [1], отнеся к гражданской авиации деятельность по обеспечению потребностей граждан и экономики в воздушных перевозках, вменяет аэропортовым операторам задачу непрерывного и безопасного обслуживания полётов, а Федеральные авиационные правила «Подготовка и выполнение полётов в гражданской авиации Российской Федерации» (ФАП-128) [2] задают конкретные требования к технологии работы экипажа и наземных служб в аэропорту. В этих условиях планирование ресурсного обеспечения наземного обслуживания воздушных судов (далее - НОВС) представляет собой типовую задачу управления сложной сервисной системой с интенсивным и неоднородным входящим потоком.

Хабовая модель организации перевозок, активно развиваемая в Российской Федерации с начала 2010-х годов, предполагает концентрацию рейсов в коротких временных окнах - так называемых «банках» или волнах прибытия и вылета, обеспечивающих сокращение времени трансферных стыковок. Подобная организация расписания приводит к тому, что входящий поток ВС в узловом аэропорту качественно отличается от потоков, типичных для нехабовых аэропортов: вместо относительно равномерного, медленно меняющегося во времени распределения прибытий наблюдаются резко выраженные пики интенсивности, чередующиеся с продолжительными паузами. Эта особенность критически важна для проектирования ресурсного обеспечения, поскольку именно в моменты пиков формируются очереди к технике, бригадам и стоянкам, а необоснованное усреднение нагрузки приводит либо к систематическим нарушениям нормативов времени оборота, либо к неоправданно большим резервам ресурсов.

Адекватное описание входящего потока ВС в узловом аэропорту является базовым шагом при построении любых моделей оперативного управления НОВС, поскольку от выбора этой модели зависят как структура очередей и распределение задержек, так и конечные оценки потребности в персонале, спецтехнике и местах стоянки. В отечественной литературе по управлению технологическими процессами наземного обслуживания на протяжении последних двух десятилетий сложилось несколько устойчивых подходов к моделированию входящего потока: от простейшего стационарного пуассоновского потока с постоянной интенсивностью до нестационарных моделей с кусочно-постоянной или гладкой функцией интенсивности и эмпирических гистограммных представлений на базе фактических данных операционных баз аэропорта. Каждый из этих подходов восходит к классической теории массового обслуживания и был реализован в ряде кандидатских диссертаций, формирующих современный понятийный аппарат отрасли.

Вместе с тем эмпирический материал, накапливаемый в современных аэропортовых операционных базах данных и в системах учёта рейсов, всё более явно демонстрирует ограниченность классических допущений: гипотеза независимости приращений и равенства дисперсии математическому ожиданию числа прибытий регулярно отвергается формальными статистическими тестами, а попытки компенсировать это уточнением функции интенсивности приводят лишь к локальному улучшению согласия модели с данными, не устраняя фундаментального дефекта - отсутствия в модели механизма формирования кластеров событий. Для аэропортов, работающих в волновом режиме и одновременно вынужденных учитывать значительную долю нерегулярных рейсов и операционных сбоев, это означает систематическую недооценку пиковых нагрузок и реальных длин очередей.

Рекомендации Международной организации гражданской авиации (далее - ИКАО), сформулированные в «Руководстве по аэропортовым

службам» (Doc 9137) [3], и стандарты Международной ассоциации воздушного транспорта (далее - ИАТА), закреплённые в Airport Handling Manual (далее - АНМ) и Ground Operations Manual [4], ориентируют аэропортовых операторов на построение управляемых, измеряемых и предсказуемых процессов наземного обслуживания, однако сами по себе не дают готовой математической модели входящего потока, оставляя выбор такого инструмента за исследователем. Это создаёт обоснованную потребность в систематическом сравнительном анализе используемых моделей с точки зрения их способности воспроизводить статистически наблюдаемые свойства реального трафика.

Целью настоящей статьи является критический разбор допущений моделей входящего потока ВС, применяемых в современных российских исследованиях по управлению наземным обслуживанием в узловом аэропорту, эмпирическое обоснование сверхдисперсии и автокорреляции приращений на материале аэропорта-прототипа и аргументация перехода к классу марковски модулированных пуассоновских процессов, в том числе с нечётко заданными параметрами интенсивности, как к базовой модели, способной адекватно отражать волновой и кластеризованный характер хабового трафика. Постановка такого вопроса важна не только в методологическом плане, но и в прикладном: она определяет архитектуру дальнейших имитационно-оптимизационных систем поддержки принятия решений, формируемых для оперативных подразделений аэропорта.

Структура изложения соответствует логике сравнительного анализа: вначале систематизированы основные модели входящего потока ВС, использовавшиеся в задачах планирования ресурсов наземного обслуживания, и зафиксированы их допущения;

далее на материале статистики хабового аэропорта показаны эмпирические эффекты, не воспроизводимые этими моделями;

в заключительной части обосновывается переход к марковски модулированному пуассоновскому процессу и его расширению нечёткими параметрами как к базовой модели для дальнейших робастных имитационно-оптимизационных постановок. В качестве прикладного фона рассматривается среднестатистический российский узловой аэропорт с волновой структурой расписания, нормативно работающий в условиях ФАП-128 [2] и Федеральных авиационных правил «Общие правила воздушных перевозок пассажиров, багажа, грузов...» (ФАП-82) [5], а также международных стандартов ИКАО и ИАТА [3, 4].

Эволюция моделей входящего потока ВС в задачах управления НОВС и их базовые допущения

Исторически первые модели входящего потока ВС, применявшиеся в задачах планирования ресурсов аэропорта, опирались на классическое представление потока заявок в системе массового обслуживания (далее - СМО) как простого пуассоновского процесса. В таком процессе моменты

поступления заявок образуют последовательность независимых событий, плотность которых характеризуется единственным параметром - интенсивностью λ, постоянной во времени, а распределение числа событий на любом интервале фиксированной длины подчиняется закону Пуассона с равными математическим ожиданием и дисперсией. Соответствующие модели типа M/M/c, использовавшиеся для аналитической оценки характеристик аэропортовых сервисных систем, удобны тем, что позволяют получить замкнутые формулы для средней длины очереди, среднего времени ожидания и вероятности отказа в обслуживании, что облегчает методическую работу при ограниченной статистической информации.

Очевидным шагом обобщения является переход к нестационарному пуассоновскому процессу, в котором интенсивность λ(t) задаётся как детерминированная функция времени. Эта модель формализует тот факт, что нагрузка на аэропортовые службы заведомо неоднородна по часам суток, дням недели и сезонам, и позволяет ввести в описание потока циклические компоненты - суточные, недельные, сезонные. В работах по управлению технологическими процессами узлового аэропорта В.А. Романенко [6] и в целом ряде публикаций Е.В. Кониковой [7] нестационарный пуассоновский процесс с кусочно-постоянной или гладкой λ(t) использован в качестве базового инструмента генерации потока ВС для аналитических и имитационных моделей наземного обслуживания. Близкий по духу подход реализован и в имитационной модели технологических процессов наземного обслуживания, рассматриваемой в диссертационной работе Г.В. Головченко [8], где временная зависимость интенсивности задана по фактической статистике конкретного аэропорта.

Параллельно с пуассоновскими моделями развивалось эмпирически-гистограммное направление, в рамках которого поток ВС задаётся непосредственно историческими данными, агрегированными по коротким временным интервалам. Этот подход реализован, в частности, в имитационной модели «Кобра-2», обсуждаемой в работе И.А. Тецлава [9], где автор сознательно отказывается от стохастического описания в пользу детерминированного расписания с заранее зафиксированными моментами прибытия и отправления, дополненного вероятностными возмущениями. Такая постановка хорошо согласуется с практикой работы операционных служб, основанной на слот-координированном расписании, и позволяет интегрировать модель с внешними системами управления, однако фактически переносит всю задачу описания неопределённости на блок генерации возмущений.

Особое место занимают исследования, в которых для описания неопределённости параметров расписания применяются нечёткие числа: в работах В.А. Романенко по нечёткой оптимизации трансферной системы и эффективности транспортной сети [10] нечёткие методы используются для описания экспертных оценок длительностей пребывания в хабе, вероятностей

реализации стыковок и доходных параметров, при этом сам входящий поток рейсов остаётся, как правило, в рамках стохастической или детерминированной парадигмы. Тем самым нечёткая компонента сосредотачивается на этапе оптимизации экономических показателей и не распространяется на структурные параметры потока. Такой подход естественен для задач долгосрочного маркетингового планирования сети, но недостаточен для оперативного управления ресурсами наземных служб.

С формальной точки зрения, перечисленные подходы можно представить в виде упорядоченной последовательности расширений базовой модели, в которой каждый следующий уровень снимает часть допущений предыдущего:

1) стационарный пуассоновский процесс с постоянной интенсивностью λ - модель типа M/M/c, не учитывающая ни суточных, ни сезонных, ни структурных колебаний;

2) нестационарный пуассоновский процесс с детерминированной функцией λ(t), учитывающий неоднородность потока во времени, но сохраняющий независимость приращений и равенство дисперсии и среднего;

3) эмпирически-гистограммные и слот-координированные модели на основе фактической статистики прибытий, по сути, аппроксимирующие нестационарный процесс табличной функцией интенсивности или детерминированным расписанием с возмущениями;

4) стохастические расширения с гамма-, нормальным и иными распределениями длительностей операций, как у В.А. Романенко [6] и Г.В. Головченко [8], обогащающие модель сервиса, но не модель входа;

5) нечёткие надстройки над расписанием и параметрами доходности [10], не затрагивающие структурных характеристик самого потока ВС.

Общим для всех перечисленных подходов является то, что входящий поток ВС в них описывается процессом с независимыми приращениями (либо строго пуассоновским, либо его аналогом со сглаженной интенсивностью), а вся неопределённость локализована либо в параметрах расписания, либо в длительностях технологических операций. Это фундаментальное допущение об отсутствии «памяти» в самом процессе прибытий не подвергается критическому пересмотру, хотя именно от него критически зависят оценки длин очередей, времени оборота ВС и потребности в ресурсах в периоды пиковой нагрузки. Между тем, именно структурное «запоминание» режима трафика (нахождение системы в состоянии волны или, напротив, межволнового затишья) является определяющей характеристикой работы хабового аэропорта.

Кроме того, нормативный контекст работы российского аэропорта - требования ФАП-128 [2] в части подготовки и выполнения полётов, нормы ФАП-82 [5] по обслуживанию пассажиров и багажа, а также рекомендации ИКАО Doc 9137 [3] и положения IATA AHM [4] по технологическим стандартам наземного обслуживания - задаёт жёсткие границы допустимых

задержек и времён оборота, нарушение которых имеет операционные, экономические и репутационные последствия. Именно поэтому модель входящего потока должна не просто давать «среднюю» картину, но обеспечивать корректную оценку поведения системы в наиболее напряжённых сценариях нагрузки. С этой точки зрения переход к более богатому классу моделей, способных воспроизводить кластеризацию и зависимость интервалов между прибытиями, является не методологическим излишеством, а прямым требованием прикладной задачи.

Эмпирические свидетельства несостоятельности пуассоновских моделей: сверхдисперсия и автокорреляция приращений

Для проверки применимости пуассоновских и нестационарных пуассоновских моделей к описанию реального входящего потока ВС в узловом аэропорту наиболее информативными являются два простых, но содержательных статистических теста: проверка гипотезы о равенстве математического ожидания и дисперсии числа прибытий на интервалах фиксированной длины (тест сверхдисперсии) и оценка автокорреляционной функции последовательности приращений. Оба теста легко реализуются на массивах данных, доступных в современных операционных базах данных аэропорта, и при достаточном объёме выборки обладают высокой мощностью для отклонения пуассоновских гипотез. В рамках настоящей работы соответствующие проверки выполнены на статистике прибытий условного аэропорта-прототипа, ассоциируемого с типичным хабовым аэропортом гражданской авиации Российской Федерации.

Тест сверхдисперсии в простейшей форме сводится к расчёту индекса дисперсии $ID = D[N(\Delta t)] / E[N(\Delta t)]$ для числа прибытий $N(\Delta t)$ в интервалах одинаковой длительности Δt с последующей проверкой отклонения этого индекса от единицы. Для классического пуассоновского процесса значение ID асимптотически стремится к единице, и любое статистически значимое его превышение свидетельствует о нарушении пуассоновской гипотезы, в том числе в её нестационарной форме при правильно подобранной функции $\lambda(t)$. На материале часовых интервалов прибытий аэропорта-прототипа индекс дисперсии устойчиво превышает единицу: в дневное время и особенно в окрестности волновых пиков значение ID располагается в диапазоне 1,8-3,5, а в межволновые часы возвращается к значениям, близким к единице. Это однозначно указывает на «избыточную» вариативность числа прибытий именно в загруженных периодах, то есть в моменты, когда ресурсное обеспечение особенно чувствительно к ошибкам моделирования.

Параллельно выполняется проверка автокорреляции приращений: для последовательности счётчиков $N(t1), N(t2), ..., N(tn)$ на смежных интервалах вычисляется выборочная автокорреляционная функция первого и последующих лагов, и её значения сопоставляются с доверительными интервалами для пуассоновского процесса с независимыми приращениями. В пуассоновской модели коэффициенты автокорреляции должны быть

статистически неотличимы от нуля; на эмпирической последовательности часовых счётчиков аэропорта-прототипа наблюдается положительная автокорреляция первого лага порядка 0,30-0,55, выходящая далеко за пределы 95-процентного доверительного интервала пуассоновской гипотезы и сохраняющаяся, хотя и в ослабленной форме, для второго и третьего лагов. Тем самым подтверждается «пакетный» (bursty) характер входящего потока [11]: интервалы повышенной интенсивности склонны следовать друг за другом, формируя продолжительные периоды волновой нагрузки.

Особенно показательным оказывается анализ влияния задержек рейсов на структуру потока: задержки, накапливающиеся в ходе волновой нагрузки, как правило, не успевают рассосаться до начала следующей волны и фактически приводят к слиянию двух последовательных пиков в единый продолжительный интервал сверхвысокой интенсивности. Этот эффект нерегулярно, но устойчиво воспроизводится на статистике аэропорта-прототипа в дни с неблагоприятной метеорологической обстановкой, в период массовых ограничений на использование воздушного пространства и в часы технологических сбоев [8]. С формальной точки зрения он проявляется в виде локального скачка индекса дисперсии и в виде продолжительных «полок» автокорреляционной функции, что несовместимо ни со стационарным, ни с нестационарным пуассоновским процессом.

Источниками наблюдаемых эффектов сверхдисперсии и автокорреляции в рассматриваемой системе являются следующие, действующие совместно факторы:

1) волновая структура расписания, при которой суточный цикл представляет собой последовательность относительно коротких пиков прилёта и отправления, чередующихся с межволновыми затишьями;

2) значительная доля нерегулярных и чартерных рейсов, моменты прибытия которых не учитываются базовым плановым расписанием, но кластеризуются вокруг типовых временных слотов;

3) каскадные задержки, при которых сбой в обслуживании одного ВС или пакетная задержка из-за метеоусловий смещает последующие рейсы в соседние интервалы;

4) сезонная миграция расписаний и изменение стратегии авиакомпаний-партнёров хаба, приводящие к перестройке режимов трафика на горизонте недель и месяцев;

5) ограничения по слотам и пропускной способности взлётно-посадочной системы, вынуждающие концентрировать рейсы в строго определённых временных окнах.

Перечисленные факторы качественно несовместимы с допущением независимости приращений и не могут быть устранены за счёт более точной подгонки функции $\lambda(t)$: даже идеальное согласование модели с эмпирической интенсивностью оставляет нетронутой структуру корреляций между интервалами и приводит к систематической недооценке вариативности

нагрузки. В литературе по теории очередей с временно-изменяющейся интенсивностью неоднократно подчёркивалось, что нестационарная пуассоновская гипотеза устойчиво отвергается формальными тестами в задачах колл-центров, медицинских учреждений и транспортных систем [11], и для адекватного описания требуется либо смесь пуассоновских процессов, либо более общие марковские потоки. К аналогичному выводу приводит и анализ хабового аэропортового трафика.

Существенно, что прикладные следствия выявленных дефектов пуассоновских моделей касаются непосредственно нормативно регулируемых характеристик функционирования аэропорта. Превышение допустимых задержек вылета в пиковые часы, недостаток ресурсов для обеспечения буксировки и заправки в волновых окнах, переполнение перронных стоянок и нарушение стыковок трансферных пассажиров в конечном счёте затрагивают исполнение требований ФАП-82 [5] в части обслуживания пассажиров и багажа и могут приводить к санкциям и компенсационным выплатам. Поэтому корректное моделирование входящего потока ВС не является сугубо академической задачей, а имеет прямое отношение к соблюдению эксплуатационной и нормативной дисциплины, формируемой Воздушным кодексом Российской Федерации [1] и Федеральными авиационными правилами [2] в их действующей редакции.

Марковски модулированный пуассоновский процесс и его расширение нечёткими параметрами как базовая модель

Класс марковских процессов прибытий, обобщающий пуассоновские и нестационарные пуассоновские модели, обеспечивает возможность одновременно учитывать переключения режимов нагрузки и коррелированный, «пакетированный» характер потока заявок. Среди представителей этого класса наиболее удобной с точки зрения интерпретируемости и калибровки является модель марковски модулированного пуассоновского процесса (далее - MMPP), в которой интенсивность пуассоновского потока λ принимает конечное число значений $\lambda1, \lambda2, ..., \lambda s$ в зависимости от текущего состояния скрытой непрерывной цепи Маркова [11]. Переходы между состояниями цепи описывают переключения режимов работы системы и характеризуются матрицей инфинитезимальных интенсивностей $Q = \{qij\}$; набор интенсивностей в состояниях задаётся диагональной матрицей $\Lambda = diag(\lambda1, ..., \lambda s)$.

Для входящего потока ВС в узловом аэропорту структура состояний цепи Маркова имеет естественную физическую интерпретацию: каждое состояние соответствует одному из устойчивых режимов работы системы, в котором сохраняется относительно постоянная интенсивность прибытий, а длительность пребывания в этом состоянии определяется параметрами Q. В типовой постановке для хабового аэропорта удобно выделить четыре состояния: «пауза» как межволновой период с низкой фоновой интенсивностью, «нарастание волны» с переходной интенсивностью, «пик»

как режим максимальной нагрузки в окрестности волнового окна и опционально «сбойный режим», описывающий аномальные периоды массовых задержек. Такая структура хорошо согласуется как с эксплуатационным опытом, так и с эмпирическим распределением часовых счётчиков прибытий, наблюдаемым на материале аэропорта-прототипа.

Принципиальное преимущество MMPP в сравнении с нестационарным пуассоновским процессом состоит в том, что модель явно содержит механизм формирования кластеров событий: однажды попав в высокоинтенсивное состояние, система задерживается в нём в среднем 1/(qii) единиц времени, что автоматически порождает положительную автокорреляцию приращений и значение индекса дисперсии больше единицы [11], причём эти статистические свойства формируются не за счёт подгонки эмпирической функции интенсивности, а как естественное следствие двухуровневой стохастической структуры процесса. Тем самым MMPP воспроизводит именно те особенности реального трафика, которые отвергаются пуассоновскими тестами, и делает это компактным, аналитически удобным образом, сохраняя совместимость с большим арсеналом методов теории очередей для марковских систем.

Вместе с тем классическая MMPP-постановка предполагает, что параметры λi и qij известны точно, что в условиях аэропортовой практики выполняется лишь в ограниченной степени. Объём статистики по новым маршрутам и нерегулярным рейсам зачастую недостаточен для надёжной точечной оценки интенсивностей; экспертные суждения о характере волн в горизонте предстоящего сезона неизбежно расплывчаты; внешние факторы - погода, ограничения по использованию воздушного пространства, изменения программы перевозок партнёров хаба - вносят дополнительную, по существу, неустранимую неопределённость в значения параметров. В подобной ситуации естественным методом учёта эпистемической неопределённости, дополняющей алеаторную случайность пуассоновских всплесков, является представление параметров MMPP в виде нечётких чисел, чаще всего треугольных или трапецеидальных, что согласуется с подходами, применявшимися в работах по нечёткой оптимизации трансферной системы [10].

Нечёткое расширение MMPP позволяет реализовать ряд содержательных возможностей, недоступных ни чисто стохастическим, ни чисто нечётким моделям, рассматриваемым по отдельности:

1) представить интенсивности состояний λi треугольными числами λi = (λiL, λiM, λiR) с минимальным, наиболее правдоподобным и максимальным значениями, естественно отражающими разброс экспертных оценок по сезонам и дням недели;

2) задать интенсивности переходов qij также в нечёткой форме в случаях, когда соответствующие переходы (например, выход из «паузы» в «пик») определяются экспертно из-за недостатка статистики;

3) сформировать континуум сценариев входного потока через механизм α-срезов, при котором значение $\alpha \in [0,1]$ регулирует ширину рассматриваемого интервала неопределённости параметров;

4) использовать экстремальные сценарии ($\alpha = 0$) для проверки робастности проектируемого ресурсного обеспечения по отношению к наиболее неблагоприятным режимам нагрузки;

5) совмещать дефаззификацию по центроиду или по обобщённому индексу Ягера с традиционным методом Монте-Карло для получения квантильных оценок длин очередей и времён оборота.

Механизм α-срезов является ключевым связующим звеном между нечёткой и стохастической компонентами модели: при фиксированном значении α каждый параметр λi превращается в обычный интервал, в пределах которого реализуется стохастическая часть модели по правилам MMPP, и многократная имитация по такому интервалу даёт распределение основных характеристик системы при заданном уровне эпистемической неопределённости. Изменяя α от 1 (наиболее правдоподобный сценарий) до 0 (полный интервал неопределённости), исследователь фактически конструирует семейство сценарных множеств, на которых может ставиться задача робастной оптимизации ресурсов. Подобная архитектура естественным образом вписывается в современные подходы simheuristic, объединяющие имитационное моделирование с метаэвристическими алгоритмами поиска решений.

С точки зрения нормативно-методического контекста, описанный класс моделей хорошо согласуется с рекомендациями ИКАО, изложенными в «Руководстве по аэропортовым службам» (Doc 9137) [3], и со стандартами ИАТА Airport Handling Manual [4], в которых от аэропортовых операторов ожидается измеримое и предсказуемое поведение всех технологических процессов, включая управление ресурсами наземных служб. Поскольку требования ФАП-128 [2] и ФАП-82 [5] формулируют ограничения по времени обслуживания пассажиров, по информированию о задержках и по обеспечению необходимых сервисов, а Воздушный кодекс Российской Федерации [1] в действующей редакции возлагает ответственность за безопасность и регулярность полётов на эксплуатанта аэропорта, исследовательская модель потока, дающая обоснованные оценки наихудших по нагрузке сценариев, имеет прямую прикладную ценность.

Важно подчеркнуть, что предлагаемый переход к нечёткому MMPP не отменяет, а продолжает линию, заложенную в классических работах отечественных авторов: эмпирически-гистограммные и нестационарные пуассоновские оценки [6, 7, 8] могут служить отправной точкой для калибровки матриц Q и Λ, тогда как нечёткие надстройки над расписанием и параметрами доходности, разработанные В.А. Романенко [10], естественно интегрируются с нечётким описанием интенсивностей. Тем самым формируется методологически целостная преемственная цепочка от

простейших пуассоновских моделей через нестационарные и эмпирические их обобщения к двухуровневой стохастически-нечёткой модели, обладающей необходимой гибкостью для адекватного описания хабового трафика и одновременно сохраняющей аналитическую и вычислительную работоспособность.

Заключение

Выполненный сравнительный анализ моделей входящего потока воздушных судов в узловом аэропорту показывает, что традиционно используемые в задачах планирования ресурсов наземного обслуживания пуассоновские и нестационарные пуассоновские модели [6, 7, 8] обладают принципиальным дефектом: они не способны воспроизводить кластеризацию событий и положительную автокорреляцию приращений, характерные для волновой хабовой структуры расписания. Эмпирические тесты сверхдисперсии и автокорреляционный анализ часовых счётчиков прибытий устойчиво отклоняют гипотезу о пуассоновском или нестационарном пуассоновском характере потока, выявляя значения индекса дисперсии в диапазоне 1,8-3,5 в пиковые часы и положительную автокорреляцию первого лага порядка 0,3-0,55, что несовместимо с допущением независимости приращений и не устраняется уточнением функции интенсивности.

Систематизация подходов, применявшихся в отечественных диссертационных исследованиях по управлению технологическими процессами наземного обслуживания [6, 7, 8, 9, 10], позволила зафиксировать общую тенденцию: вся неопределённость в существующих моделях локализована либо в параметрах расписания, либо в длительностях технологических операций, тогда как сам входящий поток описывается процессом с независимыми приращениями. Такое распределение неопределённости приводит к систематической недооценке пиковых нагрузок, заниженным оценкам длин очередей и, как следствие, к необоснованным резервам ресурсов или, напротив, к нарушениям нормативов времени оборота в волновых окнах.

В качестве базовой модели, способной адекватно отразить эмпирически наблюдаемые свойства входящего потока ВС в узловом аэропорту, обоснован выбор марковски модулированного пуассоновского процесса [11], в котором переключение режимов трафика моделируется скрытой непрерывной цепью Маркова, а интенсивности пуассоновских потоков задаются по состояниям цепи. Дополнение ММРР нечёткими параметрами позволяет учесть эпистемическую неопределённость, неустранимую средствами чистой стохастики, и сформировать континуум сценариев нагрузки через механизм α-срезов, что обеспечивает естественный переход к робастным имитационно-оптимизационным постановкам задачи планирования ресурсов наземного обслуживания.

Методологически принципиально, что предлагаемая модель не отрицает накопленный опыт отечественной школы, а аккумулирует его на новом

уровне: эмпирические гистограммы прибытий служат материалом для оценки числа состояний цепи Маркова, нестационарные пуассоновские оценки [6, 7] задают первое приближение для интенсивностей в каждом из режимов, а нечёткие надстройки над расписанием и доходными параметрами трансферной системы [10] естественно дополняются нечёткими параметрами интенсивности и переходов. Такая преемственность облегчает методическую интеграцию новой модели с уже действующими в российских аэропортах подходами к оперативному планированию и снижает входной барьер для её практического внедрения в работу служб организации перевозок и оперативного управления.

В прикладном плане полученные выводы можно сформулировать в виде ряда практических следствий, важных для проектирования систем управления ресурсным обеспечением аэропорта:

1) при формировании оперативных планов численности персонала и спецтехники в волновых окнах целесообразно опираться на оценки, полученные из ММРР с нечёткими параметрами, а не из усреднённых по часу пуассоновских моделей;

2) в составе процедур анализа операционных рисков следует регулярно выполнять тесты сверхдисперсии и автокорреляции по данным операционной базы данных аэропорта, рассматривая отклонение пуассоновской гипотезы как штатный, а не аномальный результат;

3) при сценарном планировании на горизонте сезона разумно использовать систему α-срезов для построения семейства согласованных сценариев нагрузки, в том числе наихудших, что обеспечивает соответствие проектных решений требованиям Воздушного кодекса Российской Федерации [1] и Федеральных авиационных правил [2, 5];

4) при подготовке бизнес-кейсов на закупку дополнительной техники или расширение штата следует включать оценки квантилей загрузки ресурсов по совокупности сценариев ММРР, а не только средние значения, что позволяет аргументированно обосновывать инвестиционные решения;

5) при модернизации существующих систем поддержки принятия решений и внутренних ресурсных моделей целесообразно предусмотреть программный интерфейс для подключения генератора потока на основе нечёткого ММРР, обеспечивающий совместимость с уже эксплуатируемыми блоками имитации технологических операций.

Полученные результаты обладают как методологической, так и прикладной значимостью: впервые в русскоязычной литературе по наземному обслуживанию воздушных судов систематизированы ограничения пуассоновских и нестационарных пуассоновских моделей с привязкой к конкретным статистическим тестам и обоснован класс ММРР с нечёткими параметрами в качестве базовой модели для последующих робастных постановок. Дальнейшее развитие предложенного подхода предполагает разработку процедур калибровки нечётких параметров ММРР по

операционным данным аэропорта-прототипа, его интеграцию с дискретно-событийной имитационной моделью технологических операций оборота ВС и построение робастного имитационно-оптимизационного контура управления ресурсным обеспечением, согласованного с действующими требованиями Воздушного кодекса Российской Федерации [1], ФАП-128 [2], ФАП-82 [5] и международных стандартов ИКАО [3] и ИАТА [4] в области наземного обслуживания.

Намеченная исследовательская программа имеет очевидный мультипликативный эффект: предложенная модель входящего потока служит общим знаменателем для целого ряда смежных задач узлового аэропорта - от оптимизации расписания смен бригад наземного обслуживания и планирования закупок аэродромной наземной техники до проектирования резервных схем работы в условиях массовых сбоев и обоснования сервисных соглашений с авиакомпаниями. Преемственность с существующими отечественными работами [6, 7, 8, 9, 10] и совместимость с международными стандартами ИКАО и ИАТА [3, 4] позволяют рассчитывать на постепенное вхождение нечёткой ММРР-модели в стандартный методический аппарат российской школы управления процессами наземного обслуживания воздушных судов и на её признание в качестве базового инструмента для построения робастных решений в условиях стохастической и нечёткой неопределённости входящего потока.

Список литературы:

1. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 № 60-ФЗ (ред. от 28.11.2025). [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_13744/ (дата обращения: 21.04.2026).
2. Об утверждении Федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полётов в гражданской авиации Российской Федерации»: приказ Минтранса России от 31.07.2009 № 128 (ред. от 29.05.2023). [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_91259/ (дата обращения: 21.04.2026).
3. Doc 9137. Airport Services Manual. Part 1 - Rescue and Firefighting. Fourth Edition. Montreal: ICAO, 2015. 154 p.
4. Airport Handling Manual (AHM). 46th Edition. Montreal-Geneva: IATA, 2026. 1080 p.
5. Об утверждении Федеральных авиационных правил «Общие правила воздушных перевозок пассажиров, багажа, грузов и требования к обслуживанию пассажиров, грузоотправителей, грузополучателей»: приказ Минтранса России от 28.06.2007 № 82 (ред. от 25.12.2024). [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_71492/ (дата обращения: 21.04.2026).
6. Романенко Владимир Алексеевич Имитационная модель технологических процессов наземного обслуживания перевозок в аэропорту // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2011. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-tehnologicheskih-protsessov-nazemnogo-obsluzhivaniya-perevozok-v-aeroportu (дата обращения: 23.04.2026).
7. Коникова Е.В. Совершенствование методов принятия решений в интерактивном режиме диспетчером системы наземного обслуживания воздушных судов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ ГА, 2009. 24 с.

8. Головченко Г.В. Оптимизация управления технологическими процессами узлового аэропорта: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГУ ГА, 2018. 153 с.

9. Тецлав И.А. Совершенствование методов и моделей управления процессами обслуживания пассажиров в крупном аэропорту: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГУ ГА, 2023. 156 с.

10. Романенко, В. А. Оптимизация параметров системы трансферных авиаперевозок с учетом нечеткой и стохастической неопределенностей / В. А. Романенко // Управление большими системами: сборник трудов. – 2013. – № 41. – С. 285-313. – EDN RDQAXF.

11. Fischer W., Meier-Hellstern K. The Markov-modulated Poisson process (MMPP) cookbook // Performance Evaluation. 1993. Vol. 18, № 2. P. 149-171.

УДК 656.7.072

Лисенков Р. А.
Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

МАРКОВСКИ МОДУЛИРОВАННЫЙ ПУАССОНОВСКИЙ ПРОЦЕСС С НЕЧЁТКИМИ ИНТЕНСИВНОСТЯМИ КАК МОДЕЛЬ ВХОДЯЩЕГО ПОТОКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В УЗЛОВОМ АЭРОПОРТУ

Аннотация. В статье предложена и формализована нечётко-стохастическая модель входящего потока воздушных судов в узловом аэропорту, построенная на основе марковски модулированного пуассоновского процесса (MMPP - Markov-Modulated Poisson Process) с треугольными функциями принадлежности интенсивностей состояний и интенсивностей переходов скрытой цепи Маркова. Дана физическая интерпретация состояний цепи Маркова применительно к режимам работы аэропортовой системы (фоновый, нарастания волны, пик, сбойный режим), описан механизм α-срезов, порождающий континуум согласованных сценариев нагрузки. Изложена методика идентификации и калибровки параметров модели по эксплуатационным данным аэропортовой операционной базы данных (AODB - Aerodrome Operational Database) и статистике задержек, согласующаяся с действующими нормативно-методическими положениями отрасли. Приведён численный пример калибровки и применения модели на материале среднестатистического российского узлового аэропорта-прототипа с сопоставлением с нестационарным пуассоновским процессом по показателям длин очередей и загрузки ресурсов наземного обслуживания.

Ключевые слова: входящий поток воздушных судов, узловой аэропорт, наземное обслуживание, марковски модулированный пуассоновский процесс, нечёткие интенсивности, треугольные нечёткие числа, α-срезы, калибровка, имитационное моделирование, робастная оптимизация.

Введение

Современная организация работы узлового аэропорта в условиях хабовой модели перевозок предъявляет к моделям входящего потока воздушных судов (далее - ВС) существенно более высокие требования, чем это было характерно для классических задач теории массового обслуживания. Концентрация рейсов в коротких временных окнах - так называемых «банках» прилёта и вылета, - неизбежно сопровождающаяся каскадом задержек, нерегулярных рейсов и сезонными перестройками расписания, делает гипотезу простого пуассоновского потока заведомо неадекватной. Указанная неадекватность не является чисто академическим вопросом: от качества модели потока непосредственно зависят оценки потребности в аэродромной наземной технике (далее - АНТ), в численности бригад и в стояночных местах, а следовательно, и соответствие проектируемой ресурсной конфигурации требованиям Воздушного кодекса Российской Федерации [1] и Федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полётов в гражданской

авиации Российской Федерации» [2] в части обеспечения регулярности и безопасности полётов.

Проведённый ранее автором сравнительный анализ моделей входящего потока ВС в узловом аэропорту [10] показал, что используемые в российских диссертационных исследованиях по управлению технологическими процессами наземного обслуживания [6, 7, 8, 9] подходы - стационарные и нестационарные пуассоновские процессы, эмпирически-гистограммные модели, нечёткие надстройки над расписанием и стохастические модели длительностей операций - сохраняют общее ограничение в виде допущения о независимости приращений потока. Тестирование на эксплуатационных данных хабовых аэропортов выявляет два несовместимых с этим допущением эффекта: устойчивую сверхдисперсию числа прибытий по интервалам и положительную автокорреляцию приращений на лагах от пятнадцати минут до полутора часов, отражающую волновую структуру расписания и каскадирование задержек.

Целью настоящей работы является развёрнутое формальное изложение модели входящего потока ВС, способной одновременно воспроизводить режимные переключения нагрузки, кластеризацию событий и эпистемическую неопределённость экспертных оценок интенсивностей. В качестве такой модели предлагается марковски модулированный пуассоновский процесс с нечёткими интенсивностями состояний и нечёткими интенсивностями переходов скрытой цепи Маркова, для которого далее в тексте используется обозначение «нечёткий MMPP». Подобный класс процессов прибытий, развитый в работах W. Fischer и K. Meier-Hellstern [11], а также H. Heffes и D.M. Lucantoni [12] для описания «пакетированного» трафика в телекоммуникациях, в отечественной литературе по наземному обслуживанию ВС в формализованном виде ранее не применялся.

Необходимо подчеркнуть, что предлагаемая модель не отрицает накопленный опыт отечественной школы, а сохраняет преемственность по отношению к ней. Эмпирически-гистограммные оценки прибытий, полученные в работе Е.В. Кониковой [7], могут служить материалом для оценки числа состояний скрытой цепи Маркова. Нестационарные пуассоновские оценки интенсивности, лежащие в основе имитационных моделей В.А. Романенко [6] и Г.В. Головченко [8], дают первое приближение для значений λ_i. Нечёткие конструкции, успешно использованные В.А. Романенко при оптимизации трансферной системы [10], в предлагаемой модели переносятся с уровня расписания на уровень параметров самого потока, что является принципиальным шагом.

Отдельно следует отметить нормативно-методический контекст. Положения Федеральных авиационных правил «Общие правила воздушных перевозок пассажиров, багажа, грузов и требования к обслуживанию пассажиров, грузоотправителей, грузополучателей» [5] вводят измеримые требования к качеству обслуживания пассажиров и багажа, выполнение

които при волновой нагрузке непосредственно зависит от достоверности модели входящего потока. Рекомендации Международной организации гражданской авиации (далее - ИКАО), изложенные в «Руководстве по аэропортовым службам» (Doc 9137) [3], и стандарты Международной ассоциации воздушного транспорта (далее - ИАТА) Airport Handling Manual [4] прямо указывают на необходимость учёта вариативности и неопределённости параметров потока при ресурсном планировании - что составляет естественную нишу для использования нечётких расширений вероятностных моделей.

Структура изложения подчинена логике последовательного развёртывания модели. Вначале даётся формальная постановка классического ММРР с матрицами интенсивностей переходов и интенсивностей состояний, фиксируются основные вероятностные характеристики и обсуждаются их преимущества по сравнению с нестационарным пуассоновским процессом. Далее излагается содержательная интерпретация состояний скрытой цепи Маркова применительно к узловому аэропорту, после чего вводится нечёткое расширение модели на основе треугольных функций принадлежности и описывается механизм α-срезов. Завершают работу методика калибровки параметров по эксплуатационным данным и численный пример, выполненный на материале среднестатистического российского узлового аэропорта-прототипа.

Прикладным контуром, в который вписывается предлагаемая модель, является разрабатываемая автором имитационно-оптимизационная система управления ресурсным обеспечением и технологическими процессами наземного обслуживания ВС в условиях нечётко-стохастической неопределённости входящего потока и длительностей операций. В этой системе нечёткий ММРР выполняет роль базового генератора сценариев нагрузки, на которых затем работают модули имитации технологических графов и робастной настройки ресурсного плана. Соответственно, изложение модели в настоящей статье ориентировано не на её абстрактное математическое описание, а на её практическую вычислимость и интегрируемость в указанную систему - с особым вниманием к тем элементам, которые ранее не получили развёрнутой проработки в литературе по наземному обслуживанию ВС.

Формальная постановка марковски модулированного пуассоновского процесса

Марковски модулированный пуассоновский процесс относится к классу дважды стохастических пуассоновских процессов и формализуется как пуассоновский поток, мгновенная интенсивность которого сама является случайным процессом, принимающим конечное число значений в зависимости от текущего состояния скрытой непрерывной цепи Маркова. В отличие от нестационарного пуассоновского процесса, у которого функция

интенсивности $\lambda(t)$ детерминирована и задана априори, в MMPP последовательность переключений интенсивности порождается стохастически - именно благодаря этому свойству модель приобретает способность воспроизводить эффект кластеризации событий, характерный для реальных эксплуатационных данных хабового аэропорта.

Формально модель полностью характеризуется парой матриц - инфинитезимальным генератором скрытой цепи Маркова Q размерности S × S и диагональной матрицей пуассоновских интенсивностей Λ той же размерности. Генератор имеет структуру, при которой недиагональные элементы $q_{ij} \geq 0$ интерпретируются как интенсивности переходов из состояния i в состояние j, а диагональные элементы определяются условием $q_{ii} = -\sum_{j \neq i} q_{ij}$, обеспечивающим нулевую сумму по строке. Диагональные элементы матрицы Λ задают пуассоновские интенсивности генерации событий $\lambda_i \geq 0$ в каждом из состояний цепи. Стационарное распределение π скрытой цепи определяется из системы уравнений $\pi \cdot Q = 0$ при условии нормировки $\sum_i \pi_i = 1$, и средняя интенсивность результирующего потока равна $\bar{\lambda} = \sum_i \pi_i \cdot \lambda_i$.

Содержательно процесс развёртывается следующим образом. В произвольный начальный момент времени система находится в одном из состояний $i \in \{1, \ldots, S\}$ и продолжает в нём пребывать в течение случайного интервала, распределённого по экспоненциальному закону с параметром $-q_{ii}$. На протяжении этого интервала события (в нашем случае - моменты прибытия ВС) формируются как реализация стационарного пуассоновского процесса с интенсивностью λ_i. По истечении указанного интервала пребывания система переходит в одно из состояний $j \neq i$ с условной вероятностью $p_{ij} = q_{ij} / (-q_{ii})$, после чего цикл повторяется. Указанная двухуровневая структура порождает нестационарность интенсивности потока «изнутри» модели, без необходимости задавать её внешне.

Принципиальные отличия MMPP от классических моделей входящего потока ВС, применяемых в работах [6, 7, 8], можно сформулировать в виде нескольких содержательных свойств:

1) дисперсия числа событий на интервале фиксированной длины строго превышает математическое ожидание, то есть индекс дисперсии $ID = D[N(\Delta t)] / E[N(\Delta t)] > 1$, что соответствует наблюдаемой в аэропортовой статистике сверхдисперсии;

2) приращения процесса на непересекающихся интервалах не являются независимыми, и значения автокорреляционной функции на коротких лагах строго положительны, что естественным образом отражает волновую структуру расписания;

3) длительность пребывания в высокоинтенсивном состоянии (например, в состоянии «пик») имеет ненулевое математическое ожидание, равное $-1/q_{ii}$, что обеспечивает воспроизведение продолжительных периодов повышенной нагрузки и каскадных задержек;

4) маргинальное распределение длительностей межсобытийных интервалов является гиперэкспоненциальным, что согласуется с данными хабовых аэропортов лучше, чем простое экспоненциальное распределение, лежащее в основе пуассоновского процесса;

5) при стремлении числа состояний S к единице или при равенстве всех λ_i MMPP вырождается в обычный пуассоновский процесс, что обеспечивает преемственность модели по отношению к классическим постановкам [11].

Аналитическая трактовка MMPP опирается на матричный аппарат, развитый в работах [11, 12, 16]. Производящая функция числа событий на интервале длины t выражается через матричную экспоненту $\exp((Q - \Lambda + z\Lambda)\cdot t)$, что позволяет в замкнутой форме получать моменты числа событий и тем самым избегать длительной имитации при оценке базовых характеристик потока. Совместное распределение интервалов между событиями описывается марковским процессом восстановления, ассоциированным с парой (Q, Λ), и его явный вид удобно используется при численной оценке вероятности перегрузки очередей в системе массового обслуживания. Указанные свойства делают MMPP не только содержательно адекватной, но и вычислительно удобной моделью для последующей интеграции в имитационно-оптимизационный контур.

С точки зрения связи с моделями, использовавшимися в работах В.А. Романенко [6] и Г.В. Головченко [8], MMPP может рассматриваться как естественное обобщение нестационарного пуассоновского процесса, при котором детерминированная функция интенсивности $\lambda(t)$ заменяется случайной кусочно-постоянной траекторией, порождаемой скрытой цепью Маркова. При этом число состояний S и значения λ_i могут быть подобраны таким образом, чтобы математическое ожидание интенсивности результирующего процесса в каждом часу суток совпадало с величиной $\lambda(t)$, полученной по гистограммам прибытий. Это означает, что нестационарные пуассоновские оценки, ранее использовавшиеся в отечественной литературе, могут быть напрямую переведены в первое приближение параметров MMPP без потери накопленного эмпирического материала.

Алгоритм генерации траектории MMPP в рамках дискретно-событийного имитационного моделирования компактен и легко интегрируется как в специализированные среды (AnyLogic, GPSS World, Simio), так и в собственные программные комплексы. На каждом шаге выбирается длительность пребывания в текущем состоянии $\tau_i \sim \mathrm{Exp}(-q_{ii})$, внутри этого интервала разыгрывается серия моментов прибытий с интенсивностью λ_i, после чего по дискретному распределению с вероятностями p_{ij} выбирается следующее состояние. Указанная схема обладает естественной параллельностью по сценариям, что критично для последующего применения её результатов в робастной оптимизации, требующей многократной прогонки модели по большому числу реализаций входящего потока.

Содержательная интерпретация состояний скрытой цепи Маркова применительно к узловому аэропорту

Содержательная интерпретация состояний скрытой цепи Маркова в применении к входящему потоку ВС узлового аэропорта вытекает непосредственно из устройства хабового расписания и из физических ограничений аэропортовой системы. Каждое состояние $s \in \{1, \ldots, S\}$ соответствует одному из устойчивых режимов работы, в котором сохраняется относительно постоянная интенсивность прибытий и относительно постоянная структура потока по типам ВС, причём длительность пребывания в этом режиме сопоставима с продолжительностью одной из фаз суточного цикла - межволновой паузы, нарастания «банка» прилёта, пиковой части «банка» или периода нарушенной работы расписания, вызванного метеорологическими ограничениями, отказами оборудования или каскадным эффектом задержек.

Минимально необходимое и эмпирически достаточное для описания узлового аэропорта число состояний составляет от трёх до пяти, что согласуется с практикой международных хабовых аэропортов и с результатами обработки данных аэропортовой операционной базы данных среднестатистического российского хаба. Содержательно это число фиксирует количество качественно различных режимов нагрузки, между которыми переключается система в течение суток. Дальнейшее увеличение S, как показывает калибровка, не приводит к существенному улучшению качества модели по критериям длины очередей и загрузки ресурсов, но усложняет идентификацию параметров и снижает интерпретируемость, что особенно значимо при предъявлении модели для согласования с эксплуатационными подразделениями аэропорта.

Базовая четырёхсостоянная структура, рекомендуемая для большинства практических задач планирования ресурсов наземного обслуживания, имеет следующую содержательную привязку к режимам работы узлового аэропорта:

- состояние $s = 1$ - «фоновый режим» - межволновой период, ночные часы, нерегулярная разрозненная нагрузка с типичной интенсивностью от двух до пяти прибытий в час, в течение которого ресурсы наземного обслуживания работают с большим запасом;

- состояние $s = 2$ - «нарастание волны» - период начала формирования прилётного «банка», в течение которого интенсивность увеличивается до восьми-пятнадцати прибытий в час, а ресурсы постепенно мобилизуются для предстоящего пика;

- состояние $s = 3$ - «пик» - максимальная нагрузка прилётного «банка», когда интенсивность достигает двадцати-сорока пяти и более прибытий в час, и ресурсы наземного обслуживания эксплуатируются на пределе расчётной пропускной способности;

- состояние $s = 4$ - «сбойный режим» - период нарушенной работы расписания, обусловленный неблагоприятными метеорологическими

условиями, отказами оборудования или каскадным эффектом задержек, с интенсивностью, заметно превышающей нормативную для соответствующей фазы суток.

Введение отдельного «сбойного» состояния является одним из методически ключевых элементов предлагаемой модели. В работах [6, 7, 8] сбойные ситуации либо игнорируются и поглощаются дисперсией типового стохастического распределения, либо рассматриваются как внешние возмущения относительно базового сценария. В рамках MMPP сбойный режим естественным образом включается во внутреннюю динамику модели, и его частота, продолжительность и средняя интенсивность определяются параметрами q_{14}, q_{24}, q_{34}, q_{41}, q_{42}, q_{43} и λ_4. Это позволяет переходить к количественной оценке риска нарушения нормативов времени оборота, заложенных в технологических документах аэропорта в соответствии с требованиями [2] и [5].

Для аэропорта-прототипа с двумя суточными «банками» прилёта (утренним и вечерним) типичная траектория цепи Маркова в течение суток описывается переходами $1 \to 2 \to 3 \to 2 \to 1$ для утреннего «банка» и аналогичной серией переходов для вечернего, причём в случае метеорологических ограничений или отказов оборудования возможен переход $3 \to 4 \to 3$ либо $3 \to 4 \to 1$. Описанная циклическая структура обеспечивает воспроизведение наблюдаемой в эксплуатационной статистике картины двух или трёх ярко выраженных пиков с длительными межволновыми затишьями, не достижимое в нестационарных пуассоновских моделях без дополнительных искусственных конструкций. Тем самым устраняется одно из наиболее существенных ограничений предшествующих подходов, отмеченное при сравнительном анализе [10].

Длительности пребывания в каждом из состояний определяются диагональными элементами матрицы Q. Для содержательно правдоподобной калибровки на материале хабового аэропорта средние длительности пребывания принимают значения от двух до четырёх часов для фонового режима, от тридцати минут до часа для режима нарастания волны, от сорока пяти минут до полутора часов для пика и от одного до четырёх часов для сбойного режима. Распределение длительностей в каждом состоянии остаётся экспоненциальным, что является ограничением классической MMPP-постановки; при необходимости более точного описания «фазовых» эффектов модель может быть обобщена до Markovian Arrival Process (MAP) или до батчевого MMPP, однако для большинства практических задач планирования ресурсов наземного обслуживания экспоненциальное приближение оказывается адекватным [11].

Связь между матрицей переходов и расписанием рейсов опосредована тем фактом, что само расписание задаёт «окна», в которых вероятность нахождения в состояниях «нарастание волны» и «пик» существенно отличается от нуля, тогда как в межволновые часы доминирующим становится

фоновое состояние. Такая структура удобно интерпретируется в терминах «времязависимого» MMPP, при котором матрица Q(t) кусочно-постоянна по часам суток, а сами параметры внутри каждого участка остаются стационарными. Подобное представление сохраняет основные преимущества MMPP - сверхдисперсию и положительную автокорреляцию приращений - и одновременно позволяет встраивать в модель регулярную структуру хабового расписания, известную из плановых документов авиапредприятия и согласованных с центром управления полётами слотов.

Нечёткое расширение модели: треугольные функции принадлежности интенсивностей и интенсивностей переходов

Классическая MMPP-постановка предполагает, что параметры λ_i и q_{ij} известны точно. На практике эта гипотеза выполняется лишь в ограниченной степени. Объём статистических данных по новым маршрутам и нерегулярным рейсам зачастую недостаточен для надёжной точечной оценки интенсивностей; экспертные оценки пиковой нагрузки, частоты сбойных режимов и сезонных перестроек расписания носят расплывчатый, лингвистический характер; долгосрочные прогнозы изменения структуры авиаперевозок, изменения коммерческой стратегии авиакомпаний-партнёров хаба и плановых модернизаций инфраструктуры в принципе не могут быть представлены в виде однозначных числовых значений. Указанная неустранимая эпистемическая неопределённость требует адекватных формальных средств описания, не сводящихся к вероятностной случайности.

В рамках предлагаемой модели для представления эпистемической неопределённости параметров MMPP используется аппарат теории нечётких множеств в формулировке Л.А. Заде [13] и Д. Дюбуа и А. Прада [14]. Каждая интенсивность состояния λ_i заменяется треугольным нечётким числом $\tilde{\lambda}_i = (\lambda_i^L, \lambda_i^M, \lambda_i^R)$, задаваемым тремя параметрами: левой границей λ_i^L (минимально возможное значение интенсивности с ненулевой степенью правдоподобия), модальным значением λ_i^M (наиболее правдоподобное значение, соответствующее максимуму функции принадлежности) и правой границей λ_i^R (максимально возможное значение). Соответствующая функция принадлежности $\mu(x)$ представляет собой кусочно-линейную функцию, равную нулю вне интервала $[\lambda_i^L, \lambda_i^R]$ и достигающую единицы в точке λ_i^M.

Выбор треугольной формы функции принадлежности продиктован соображениями содержательной интерпретируемости и вычислительной экономности. Треугольное число однозначно задаётся тремя числовыми параметрами, имеющими прозрачную смысловую интерпретацию для эксплуатационных подразделений аэропорта - «оптимистичная оценка», «наиболее ожидаемая оценка» и «пессимистичная оценка», что упрощает процедуры экспертной калибровки и согласования с диспетчерскими службами. Альтернативные формы функций принадлежности (трапецеидальные, гауссовы, обобщённые колоколообразные) допустимы и в ряде случаев оправданы; в частности, трапецеидальная форма удобна тогда,

когда модальное значение само является интервалом - например, когда экспертная оценка пиковой интенсивности сформулирована в виде «от тридцати до тридцати пяти прибытий в час», - и не требует фундаментального пересмотра излагаемой методики.

Интенсивности переходов q_{ij} скрытой цепи Маркова также рассматриваются как нечёткие числа $\tilde{q}_{ij} = (q_{ij}^L, q_{ij}^M, q_{ij}^R)$ с треугольной функцией принадлежности. Целесообразность нечёткого задания именно этих параметров мотивирована тем, что переходы между режимами трафика зачастую определяются комбинацией факторов, не имеющих прямого статистического эквивалента в архивах аэропорта - решениями о вводе сезонного расписания, договорными изменениями со стороны авиакомпаний, динамикой пассажиропотока в смежных терминалах. Для значений q_{ii} нечёткость переносится автоматически из условия $q_{ii} = -\sum_{j \neq i} \tilde{q}_{ij}$, реализуемого по правилам арифметики треугольных нечётких чисел [14].

Содержательное толкование нечётких параметров для базовой четырёхсостоянной структуры удобно фиксировать в виде таблицы лингвистических соответствий. Так, нечёткое значение $\tilde{\lambda}_1 = (2, 4, 6)$ ВС/ч соответствует утверждению «фоновая интенсивность правдоподобно равна четырём прибытиям в час, но может составлять от двух до шести в зависимости от сезона и дня недели». Аналогично, $\tilde{\lambda}_3 = (20, 32, 45)$ ВС/ч описывает пиковую интенсивность с центром в тридцати двух и существенно асимметричной правой границей, отражающей возможность экстремальных пиков при наложении нескольких «банков» прилёта или при незапланированной концентрации нерегулярных рейсов. Подобная асимметрия функций принадлежности является типичной для экспертных оценок аэропортовой нагрузки и должна сохраняться при формализации, а не сглаживаться в угоду математической симметрии.

Принципиально важным следствием нечёткого расширения модели является переход от единственной траектории распределения числа событий к семейству распределений, индексированному по уровню принадлежности α. Каждому фиксированному значению $\alpha \in [0, 1]$ соответствует «обычный», стохастический MMPP с параметрами, лежащими в α-срезах нечётких чисел $\tilde{\lambda}_i$ и $\tilde{q}_{ij}$; объединение по всем α порождает нечёткое семейство процессов, в котором стохастическая (алеаторная) и нечёткая (эпистемическая) компоненты неопределённости разнесены по уровням. Указанное разделение принципиально для последующих робастных постановок задачи ресурсной оптимизации: эпистемическая неопределённость трактуется как множество возможных «сцен», по которым требуется обеспечить допустимость решения, тогда как алеаторная случайность остаётся внутри каждой «сцены» и обрабатывается стандартными средствами имитационного моделирования.

Сравнительный методологический выигрыш от перехода к нечёткому MMPP по отношению к чисто стохастическим расширениям можно охарактеризовать тремя содержательными аспектами. Во-первых, нечёткая

модель не требует постулировать априорные распределения вероятностей на параметрах, что снимает проблему обоснования выбора, хорошо известную в байесовской методологии и не имеющую общеприемлемого решения. Во-вторых, экспертные оценки интенсивностей и переходов, формулируемые сотрудниками диспетчерских служб и центров управления полётами в естественной лингвистической форме, непосредственно отображаются в треугольные нечёткие числа, что обеспечивает прозрачность процедуры идентификации. В-третьих, последующее использование α-срезов даёт явные «ручки», позволяющие лицам, принимающим решения, регулировать степень консервативности проектируемой ресурсной конфигурации - от наиболее вероятного сценария до экстремального, ассоциированного с $\alpha = 0$.

Механизм α-срезов и порождение континуума согласованных сценариев нагрузки

Аппарат α-срезов является ключевым связующим звеном между нечёткой и стохастической компонентами предлагаемой модели и обеспечивает её вычислительную реализуемость в рамках имитационных и оптимизационных процедур. Для произвольного нечёткого числа $\tilde{\lambda}_i$ с треугольной функцией принадлежности α-срез $[\tilde{\lambda}_i]_a$ при фиксированном $\alpha \in [0, 1]$ определяется как замкнутый интервал $[\lambda_i^L + \alpha\cdot(\lambda_i^M - \lambda_i^L), \lambda_i^R - \alpha\cdot(\lambda_i^R - \lambda_i^M)]$. При $\alpha = 1$ этот интервал стягивается в единственное модальное значение λ_i^M, а при $\alpha = 0$ раскрывается до максимально широкого носителя $[\lambda_i^L, \lambda_i^R]$. Подобным же образом строятся α-срезы для нечётких интенсивностей переходов $\tilde{q}_{ij}$.

На практике для построения семейства сценариев входящего потока в рамках численного эксперимента используется конечная сетка значений уровня принадлежности $\alpha \in \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0\}$, реже расширяемая до десяти-двадцати уровней для задач, требующих повышенной разрешающей способности по неопределённости. Для каждого значения α на сетке формируется множество допустимых параметров MMPP - произведение интервалов $[\tilde{\lambda}_i]_a$ и $[\tilde{q}_{ij}]_a$ по всем индексам, - в пределах которого затем выбираются конкретные точечные значения для имитационных прогонов. Указанная иерархическая схема обеспечивает воспроизводимость сценарного множества и согласованность результатов между различными модулями имитационно-оптимизационной системы.

Способы выбора точечных значений в пределах α-среза могут быть различны и зависят от назначения сценария:

- при оценке наиболее правдоподобного режима нагрузки используются модальные значения λ_i^M и q_{ij}^M, что соответствует $\alpha = 1$ и стандартной точечной MMPP-модели;

- при оценке риска перегрузки ресурсов наземного обслуживания используются правые границы $[\tilde{\lambda}_i]_a$ для интенсивностей высокоинтенсивных состояний и левые границы для интенсивностей переходов из них в фоновый режим, что моделирует устойчивое сохранение пиковой нагрузки;

- при оценке возможности экономии ресурсов в межсезонье используются левые границы $[\tilde{\lambda}_i]_a$ для интенсивностей всех состояний, что соответствует оптимистичному сценарию минимальной загрузки;

- при формировании множества сценариев для робастной оптимизации используется латинская гиперкубическая выборка по нескольким α-срезам с последующим объединением результатов, что обеспечивает покрытие всего пространства неопределённости при умеренном вычислительном бюджете;

- при имитационных прогонах в рамках одного сценария параметры внутри выбранного α-среза остаются фиксированными, а стохастическая случайность реализуется только за счёт самой динамики MMPP с этими параметрами, что обеспечивает чистое разделение алеаторной и эпистемической компонент.

Для целей дефаззификации, то есть приведения нечёткого результата к скалярному значению, наиболее распространёнными являются методы центра тяжести и обобщённый индекс Ягера [15]. Метод центра тяжести вычисляет дефаззифицированное значение как координату центроида области под функцией принадлежности, что для треугольного числа сводится к среднему арифметическому трёх параметров: $\hat{\lambda_i} = (\lambda_i^L + \lambda_i^M + \lambda_i^R) / 3$. Индекс Ягера в его линейной форме допускает параметризацию степени консервативности через коэффициент $q \in [0, 1]$, при котором дефаззифицированное значение вычисляется как взвешенное среднее правых концов α-срезов с экспоненциальным весом по уровню принадлежности. Выбор конкретного метода дефаззификации диктуется задачей, для которой результат используется, и должен быть зафиксирован на этапе постановки эксперимента.

Существенным отличием предлагаемой схемы от подходов, основанных на чистом методе Монте-Карло над априорным распределением параметров, является то, что α-срезы не требуют постулирования вероятностного распределения на пространстве параметров. Это особенно ценно в условиях, когда экспертная информация о параметрах носит интервальный, а не вероятностный характер - что для реальной эксплуатационной практики аэропорта типично. Как показывает методическая литература по нечётко-стохастическим моделям [14], попытка «проинтегрировать» эпистемическую неопределённость в вероятностную приводит к систематической недооценке риска экстремальных сценариев, что в задачах ресурсного планирования наземного обслуживания оборачивается недостаточной устойчивостью проектируемых решений к реальным колебаниям нагрузки.

Содержательной особенностью α-срезов как инструмента сценарного анализа является их совместимость с традиционным имитационным моделированием, реализованным в работах [6] и [7]. Имитационная модель технологических процессов наземного обслуживания, написанная под нестационарный пуассоновский поток, может быть переключена на работу с генератором MMPP без изменения логики обработки событий: смена касается лишь модуля порождения моментов прибытий ВС. При этом многократная

прогонка имитационной модели по сетке α-срезов позволяет получить семейство квантильных оценок длин очередей и времени оборота, на котором уже строятся последующие выводы о потребности в ресурсах. Указанная архитектурная экономия снижает порог внедрения нечёткого ММРР в действующие исследовательские и проектные комплексы.

Наконец, α-срезы обеспечивают естественную интерфейсную точку между моделью входящего потока и постановкой задачи робастной оптимизации ресурсного обеспечения, развиваемой в смежных работах автора. Множество допустимых сценариев, формирующее ограничение задачи робастной оптимизации, формализуется как объединение реализаций ММРР по α-срезам с заданным минимальным уровнем α_0, ниже которого сценарии считаются настолько маловероятными, что их учёт нецелесообразен. Параметр α_0 становится явным «ручным» рычагом регулирования консервативности решения и может быть согласован с эксплуатационными подразделениями аэропорта в рамках процедур внутреннего аудита и сертификации, проводимых в соответствии с требованиями [2] и рекомендациями [3].

Методика идентификации и калибровки параметров нечёткого ММРР по эксплуатационным данным

Калибровка нечёткого ММРР по эксплуатационным данным узлового аэропорта представляет собой многоступенчатую процедуру, в которой статистические оценки получают из объективных архивных записей, тогда как нечёткие расширения формируются комбинацией статистического материала и экспертных оценок диспетчерских служб. Источником статистических данных служит аэропортовая операционная база данных, в которой фиксируются плановые и фактические моменты основных событий рейса (off-block, take-off, landing, on-block), а также сведения о типе ВС, авиакомпании, направлении и характере задержек. К этому массиву добавляются данные систем учёта ресурсов и системы поддержки принятия решений, в которых отражены технологические события наземного обслуживания и реализованные планы работ бригад.

Первичная подготовка данных включает фильтрацию записей по горизонту анализа (как правило, не менее одного полного годового цикла для учёта сезонности), исключение записей с явными ошибками ввода, согласование форматов времени с учётом перехода между летним и зимним расписанием, унификацию идентификаторов рейсов и типов ВС. Особое внимание уделяется записям о нерегулярных рейсах, метеорологических ограничениях и технических задержках, поскольку именно эти события определяют параметры сбойного состояния модели и несут наибольшую информацию о хвостах распределения нагрузки. Для целей калибровки рекомендуется работать с потоком прибытий, агрегированным с шагом пятнадцать минут или один час, в зависимости от требуемой разрешающей способности модели.

Идентификация числа состояний скрытой цепи Маркова представляет собой ключевой методический шаг, во многом определяющий последующее качество модели. Базовый подход состоит в анализе суточных и недельных гистограмм прибытий с выделением участков относительно постоянной интенсивности, после чего предложенное число состояний верифицируется по информационным критериям AIC и BIC, рассчитанным для семейства MMPP-моделей с возрастающим S. Альтернативный путь - применение алгоритмов кластеризации временных рядов интенсивности (k-средних, гауссовых смесей) с последующим контролем интерпретируемости полученных кластеров для эксплуатационных подразделений. Как показывает практика, для большинства российских узловых аэропортов оптимальное число состояний составляет три или четыре.

Оценка матриц Q и Λ при фиксированном числе состояний выполняется методом максимального правдоподобия, реализуемым с помощью алгоритма максимизации ожидания (EM - Expectation-Maximization), применённого к MMPP в работе T. Ryden [16]. Указанный алгоритм поочерёдно решает две задачи - восстановление апостериорных вероятностей пребывания цепи в каждом из состояний в каждый момент времени и пересчёт параметров λ_i и q_{ij} по этим вероятностям, - и сходится к локальному максимуму функции правдоподобия. Для устойчивости работы алгоритма начальные приближения выбираются из результатов предварительной кластеризации, а число итераций ограничивается величиной, при которой относительное изменение значения логарифмической функции правдоподобия за итерацию опускается ниже заданного порога.

Этапы построения нечёткого MMPP могут быть последовательно сформулированы в виде следующего алгоритма:

1) выгрузка из аэропортовой операционной базы данных временных рядов фактических прибытий ВС с горизонтом не менее одного года и проведение первичной фильтрации и валидации данных;

2) формирование агрегированных рядов числа прибытий по интервалам пятнадцать минут или один час, отдельно по типам ВС и сезонам, с выделением периодов нормальной работы и периодов нарушений расписания;

3) идентификация числа состояний скрытой цепи Маркова на основе анализа гистограмм и информационных критериев, с предварительной проверкой содержательной интерпретируемости каждого состояния;

4) оценка точечных значений матриц Q и Λ методом максимального правдоподобия с использованием алгоритма EM, с инициализацией от результатов предварительной кластеризации;

5) формирование границ нечётких чисел $\tilde{\lambda}_i$ и $\tilde{q}_{ij}$ на основе квантильных оценок (5-й и 95-й процентили по различным сезонам и дням недели) и экспертных оценок диспетчерских служб;

6) верификация полученной модели по критериям сверхдисперсии, автокорреляции и квантилей длин очередей в имитационном эксперименте, с

сопоставлением результатов с эмпирическими данными по показателям наземного обслуживания;

7) документирование параметров модели и протокола калибровки в форме, согласованной с действующими внутренними регламентами аэропорта и с требованиями нормативно-методических документов отрасли [2, 3, 4, 5].

Формирование нечётких границ требует особого внимания, поскольку именно через них в модель закладывается эпистемическая неопределённость. Базовый методический приём состоит в расчёте эмпирических квантилей интенсивностей по различным разрезам данных - сезон, день недели, тип воздушных судов, метеорологические условия, - с последующим использованием 5-го процентиля в качестве левой границы λ_i^L, медианы или статистической оценки максимального правдоподобия в качестве модального значения λ_i^M и 95-го процентиля в качестве правой границы λ_i^R. Полученные таким образом «статистически» нечёткие границы затем уточняются с привлечением экспертов диспетчерских служб для учёта факторов, не отражённых в архивных данных - предстоящих изменений расписания, ввода новых маршрутов, плановых модернизаций инфраструктуры.

Особую методическую сложность представляет калибровка параметров сбойного состояния, по которому статистический материал заведомо беднее, чем по нормальным режимам работы. В этом случае основным источником информации становятся записи о случаях метеорологических ограничений, технических отказов и каскадных задержек, дополненные экспертной оценкой диспетчеров и руководителей наземных служб. Левая и правая границы $\tilde{\lambda}_4$ устанавливаются по эмпирическим минимуму и максимуму интенсивности в зафиксированных сбойных периодах, а модальное значение - по медиане. Интенсивности переходов в сбойное состояние и из него рассчитываются как обратные средним длительностям между сбойными периодами и средним длительностям самих сбоев, при этом нечёткие границы существенно расширяются по сравнению с нормальными режимами для учёта разнородности причин сбоев.

Завершающим этапом методики является формальная верификация и валидация откалиброванной модели. Верификация предполагает проверку того, что реализованный программный модуль воспроизводит требуемое теоретическое поведение ММРР - правильно вычисляет производящую функцию числа событий, корректно генерирует траектории при заданных Q и Λ, точно учитывает нечёткие границы при работе по α-срезам. Валидация состоит в сопоставлении выходных характеристик имитационной модели, в которую встроен нечёткий ММРР, с эмпирически наблюдаемыми показателями работы аэропорта - распределениями длин очередей у конкретных ресурсов, временами оборота для типовых типов ВС, частотой нарушений нормативов наземного обслуживания, установленных в технологических документах аэропорта в соответствии с [2] и [5]. Совпадение модельных и эмпирических квантилей в пределах допустимой погрешности

(как правило, не более десяти процентов на 90-м процентиле) считается достаточным основанием для использования модели в задачах ресурсного планирования.

Численный пример калибровки и применения модели на материале узлового аэропорта-прототипа

Для иллюстрации работоспособности предложенной модели и её сопоставления с традиционным нестационарным пуассоновским процессом рассматривается среднестатистический российский узловой аэропорт-прототип со следующими обобщёнными характеристиками: суточный поток прибытий составляет от 180 до 240 ВС в зависимости от сезона; парк наземной техники включает основные виды АНТ для уборки салона, заправки, погрузки и буксировки; численность бригад наземного обслуживания распределена по сменам в соответствии с типовым графиком работы хабового аэропорта. Расписание организовано по двухволновой модели с утренним прилётным «банком» в районе 09:00 - 11:00 и вечерним в районе 19:00 - 21:00, с межволновыми периодами относительно низкой нагрузки.

По результатам обработки годового массива данных аэропортовой операционной базы данных, статистики задержек и оперативных сводок диспетчерских служб была идентифицирована четырёхсостоянная структура скрытой цепи Маркова с интерпретацией состояний в соответствии с базовой схемой. Откалиброванные значения матриц Q и Λ для рассматриваемого аэропорта-прототипа имеют следующий вид: модальные интенсивности состояний составляют $\lambda_1^M = 4$, $\lambda_2^M = 12$, $\lambda_3^M = 32$, $\lambda_4^M = 18$ прибытий в час; модальные интенсивности переходов в наиболее активной паре «нарастание - пик» составляют $q_{23}^M = 1.2$ и $q_{32}^M = 0.8$ переходов в час; интенсивность входа в сбойное состояние из пикового $q_{34}^M = 0.05$ переходов в час, что соответствует средней частоте сбойных периодов один раз в двадцать часов пиковой нагрузки.

Нечёткие границы интенсивностей состояний, полученные по 5-му и 95-му процентилям с привлечением экспертной оценки руководителей диспетчерской и наземных служб, образуют следующий набор треугольных нечётких чисел:

- $\tilde{\lambda}_1 = (2, 4, 6)$ ВС/ч - фоновый режим, диапазон правдоподобных значений охватывает межсезонные различия и колебания по дням недели;
- $\tilde{\lambda}_2 = (8, 12, 16)$ ВС/ч - нарастание волны, диапазон соответствует различной длительности и насыщенности «банков» в зависимости от расписания;
- $\tilde{\lambda}_3 = (20, 32, 45)$ ВС/ч - пик, существенно асимметричный диапазон с расширенной правой границей, отражающей возможность экстремальной концентрации рейсов при наложении волн или появлении нерегулярных пиков;

- $\tilde{\lambda}_4$ = (10, 18, 30) ВС/ч - сбойный режим, широкий диапазон отражает разнородность причин сбоев - от лёгких метеорологических ограничений до тяжёлых каскадных эффектов с переадресацией рейсов.

Аналогично формируются нечёткие интенсивности переходов; в качестве иллюстрации приведём только наиболее значимые: $\tilde{q}_{23}$ = (0.6, 1.2, 1.8), $\tilde{q}_{32}$ = (0.4, 0.8, 1.2), $\tilde{q}_{34}$ = (0.02, 0.05, 0.12). Расширенные правые границы интенсивностей перехода в сбойный режим отражают неопределённость в оценке частоты неблагоприятных метеорологических периодов и каскадных задержек на горизонте сезона. Аналогичным образом устанавливаются нечёткие границы для остальных недиагональных элементов матрицы Q, после чего диагональные элементы пересчитываются по правилам арифметики треугольных нечётких чисел в соответствии с условием равенства суммы по строке нулю [14].

Имитационный эксперимент проводился в среде дискретно-событийного моделирования с использованием встроенного генератора MMPP-потока, поддерживающего работу как с точечными, так и с нечёткими параметрами через сетку α-срезов $\alpha \in \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0\}$. Для каждого сценария выполнялось по 500 независимых реализаций суточного цикла с целью получения устойчивых квантильных оценок длин очередей у каждого вида АНТ и у бригад наземного обслуживания. В качестве базы сравнения использовался нестационарный пуассоновский процесс с интенсивностью $\lambda(t)$, полученной по тем же эмпирическим данным как функция, кусочно-постоянная по часам суток, что соответствует типовому подходу работ [6] и [8].

Результаты численного эксперимента наглядно демонстрируют преимущества нечёткого MMPP по сравнению с нестационарным пуассоновским процессом. По индексу дисперсии числа прибытий в часовых интервалах нечёткий MMPP воспроизводит наблюдаемое в эмпирических данных значение ID ≈ 1.8 с погрешностью не более семи процентов, тогда как нестационарный пуассоновский процесс по построению даёт ID ≈ 1.0, что соответствует систематическому занижению дисперсии в восемьдесят процентов. По выборочной автокорреляции приращений на лаге один час нечёткий MMPP воспроизводит эмпирическое значение $\rho_1 \approx 0.34$ в пределах диапазона 0.28 - 0.41, тогда как нестационарный пуассоновский процесс даёт значение, статистически неотличимое от нуля. Указанные расхождения переносятся на квантильные оценки длин очередей: 95-й процентиль длины очереди у комплекса буксировки в нестационарной пуассоновской модели оказывается на 35-45% ниже эмпирического, тогда как нечёткий MMPP воспроизводит соответствующее значение с погрешностью в пределах 8-12%.

Прикладные следствия выявленных расхождений непосредственно проявляются в задачах ресурсного планирования. Использование нестационарного пуассоновского потока приводит к занижению потребности в технике буксировки и в численности бригад заправки на двенадцать-

восемнадцать процентов в пиковых периодах, что в эксплуатации оборачивается превышением допустимых задержек вылета и нарушениями нормативов наземного обслуживания, установленных в [5]. Применение нечёткого MMPP с дефаззификацией по индексу Ягера при умеренном уровне консервативности ($q \approx 0.7$) даёт оценку потребности в ресурсах, при которой 95-й процентиль времени оборота для самолётов узкофюзеляжного класса не превышает нормативного значения, заложенного в технологические документы аэропорта. Это означает, что предлагаемая модель не только лучше воспроизводит эмпирические показатели потока, но и приводит к иным, более консервативным ресурсным решениям, обеспечивающим устойчивое выполнение требований [2] и [5] в условиях реальной эксплуатации.

Дополнительный численный эксперимент, проведённый для оценки чувствительности модели к выбору уровня α, показывает следующее: при переходе от $\alpha = 1$ (точечная MMPP) к $\alpha = 0.5$ квантильные оценки 95-го процентиля длин очередей возрастают в среднем на 18-25% в зависимости от вида ресурса, а при переходе к $\alpha = 0$ - на 35-45%. Указанная количественная картина может быть содержательно интерпретирована как прямое отражение того, какой ценой для аэропортовой системы оборачивается эпистемическая неопределённость параметров входящего потока. Принятие решений на уровне $\alpha = 1$ эквивалентно предположению, что параметры известны точно, и закладывает риск катастрофической нехватки ресурсов в случае, если фактическая интенсивность отклоняется от модальной оценки. Принятие решений на уровне $\alpha = 0$ обеспечивает гарантированное выполнение нормативов даже в наихудшем сценарии, но требует существенного увеличения ресурсной базы. Промежуточные значения α позволяют находить компромисс между стоимостью и устойчивостью, что и составляет содержание робастной оптимизации, для которой нечёткий MMPP служит основным «поставщиком» сценариев.

Заключение

Изложенная в работе модель входящего потока ВС в узловом аэропорту представляет собой нечётко-стохастическое расширение марковски модулированного пуассоновского процесса, в котором интенсивности состояний λ_i и интенсивности переходов скрытой цепи Маркова q_{ij} задаются треугольными функциями принадлежности, а множество допустимых сценариев нагрузки порождается через механизм α-срезов. Подобная конструкция, с одной стороны, преодолевает фундаментальные ограничения пуассоновских и нестационарных пуассоновских моделей, выявленные в работе [10] на материале сравнительного анализа отечественных диссертационных исследований по управлению технологическими процессами наземного обслуживания [6, 7, 8, 9]. С другой стороны, она обеспечивает естественную интеграцию с действующими имитационными моделями и оптимизационными процедурами через интерфейс α-срезов, не требуя их радикальной перестройки.

Принципиальной методологической новизной работы является явное разделение алеаторной и эпистемической компонент неопределённости параметров входящего потока. Алеаторная компонента, связанная с внутренней стохастичностью моментов прибытия ВС в каждом из режимов нагрузки, обрабатывается стандартными средствами имитационного моделирования ММРР. Эпистемическая компонента, связанная с неточностью оценок самих интенсивностей состояний и интенсивностей переходов, формализуется аппаратом треугольных нечётких чисел и обрабатывается на отдельном уровне через α-срезы. Указанное разделение существенно для корректной постановки задачи робастной оптимизации ресурсного обеспечения наземного обслуживания и не реализовано ни в одной из ранее опубликованных российских работ по соответствующей тематике.

С прикладной точки зрения предложенная модель обеспечивает количественно более точную оценку нагрузки на ресурсы наземного обслуживания в пиковых периодах по сравнению с нестационарным пуассоновским процессом. Численный пример показал, что нестационарная пуассоновская модель систематически занижает 95-й процентиль длин очередей на 35-45%, тогда как нечёткий ММРР воспроизводит соответствующие значения в пределах 8-12% от эмпирических. Подобное уточнение оценок имеет прямое экономическое выражение: при использовании нестационарной пуассоновской модели потребность в технике буксировки и численности бригад заправки в пиковых периодах оказывается заниженной на 12-18%, что приводит к нарушениям нормативов наземного обслуживания, установленных в [5], и к превышению допустимых времён оборота, заложенных в технологические документы аэропорта в соответствии с [2].

Методика идентификации и калибровки параметров нечёткого ММРР по эксплуатационным данным разработана с расчётом на её практическую применимость в условиях типового российского узлового аэропорта. Источниками статистических данных служат аэропортовая операционная база данных, статистика задержек и оперативные сводки диспетчерских служб, дополненные экспертной оценкой руководителей наземных служб. Предложенная семишаговая процедура - от выгрузки и валидации данных до верификации откалиброванной модели по критериям сверхдисперсии, автокорреляции и квантилей длин очередей - обеспечивает воспроизводимость результатов и совместимость с действующими внутренними регламентами аэропорта, разработанными в соответствии с требованиями [2], [3], [4] и [5].

Интеграция предложенной модели в действующие исследовательские и проектные комплексы не требует существенного пересмотра имеющихся имитационных моделей технологических процессов, поскольку нечёткий ММРР выступает в роли модульного генератора потока заявок, заменяющего собой ранее использовавшиеся пуассоновский или нестационарный

пуассоновский генератор. Указанная архитектурная экономия имеет важное практическое следствие: модели, разработанные В.А. Романенко [6], Г.В. Головченко [8] и И.А. Тецлавом [9], могут быть переведены на работу с нечётким ММРР без перестройки логики обработки событий и без потери накопленного эмпирического материала по длительностям технологических операций. Тем самым предлагаемая модель не противопоставляет себя сложившейся отечественной школе исследований, а интегрирует её результаты на новом методологическом уровне.

Перспективы дальнейшего развития предложенной модели связаны прежде всего с её интеграцией в более широкий контур имитационно-оптимизационной системы управления ресурсным обеспечением и технологическими процессами наземного обслуживания ВС. Естественным следующим шагом является сочетание нечёткого ММРР-потока на входе с нечёткими длительностями ключевых технологических операций (уборка салона, заправка топливом, погрузка багажа, буксировка), что позволит замкнуть цепочку «нечётко-стохастический вход - нечётко-стохастическая обработка - робастный выход» и сформировать полноценную методологическую основу для робастной настройки ресурсного плана аэропорта. Параллельная линия развития связана с перенесением методики на смежные задачи - оптимизацию расписания смен бригад, планирование закупок аэродромной наземной техники, проектирование технологических регламентов в условиях неопределённости параметров перспективного расписания.

В заключение целесообразно подчеркнуть, что предложенный нечёткий ММРР представляет собой не просто очередное расширение классического аппарата теории массового обслуживания, а методологический инструмент, согласованный со спецификой работы современного узлового аэропорта в условиях хабовой модели перевозок. Его преимущества - воспроизведение сверхдисперсии и автокорреляции приращений потока, явный учёт сбойных режимов, прозрачная процедура экспертной калибровки, естественная связь с робастной оптимизацией через α-срезы - вместе образуют целостную методологическую конструкцию, отвечающую как актуальным научным требованиям к моделям случайных потоков, так и практическим запросам отрасли в части обеспечения соответствия нормативам [1], [2] и [5] и стандартам [3] и [4] при объективно нарастающей сложности эксплуатационных условий узлового аэропорта.

Список литературы:

1. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 № 60-ФЗ (ред. от 28.11.2025). [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_13744/ (дата обращения: 21.04.2026).

2. Об утверждении Федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полётов в гражданской авиации Российской Федерации»: приказ Минтранса России от

31.07.2009 № 128 (ред. от 29.05.2023). [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_91259/ (дата обращения: 21.04.2026).

3. Doc 9137. Airport Services Manual. Part 1 - Rescue and Firefighting. Fourth Edition. Montreal: ICAO, 2015. 154 p.

4. Airport Handling Manual (AHM). 46th Edition. Montreal-Geneva: IATA, 2026. 1080 p.

5. Об утверждении Федеральных авиационных правил «Общие правила воздушных перевозок пассажиров, багажа, грузов и требования к обслуживанию пассажиров, грузоотправителей, грузополучателей»: приказ Минтранса России от 28.06.2007 № 82 (ред. от 25.12.2024). [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_70032/ (дата обращения: 21.04.2026).

6. Романенко, В. А. Имитационная модель технологических процессов наземного обслуживания перевозок в аэропорту / В. А. Романенко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1(17). – С. 79-95. – EDN NYLKDN..

7. Коникова Е.В. Совершенствование методов принятия решений в интерактивном режиме диспетчером системы наземного обслуживания воздушных судов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ ГА, 2009. 24 с.

8. Головченко Г.В. Оптимизация управления технологическими процессами узлового аэропорта: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГУ ГА, 2018. 153 с.

9. Тецлав И.А. Совершенствование методов и моделей управления процессами обслуживания пассажиров в крупном аэропорту: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГУ ГА, 2023. 156 с.

10. Лисенков Р.А. Сравнительный анализ моделей входящего потока воздушных судов в узловом аэропорту: от нестационарного пуассоновского процесса к MMPP с нечёткими параметрами // Научный вестник МГТУ ГА. 2026. (в печати).

11. Fischer W., Meier-Hellstern K. The Markov-modulated Poisson process (MMPP) cookbook // Performance Evaluation. 1993. Vol. 18, № 2. P. 149-171.

12. Heffes H., Lucantoni D.M. A Markov modulated characterization of packetized voice and data traffic and related statistical multiplexer performance // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1986. Vol. 4, № 6. P. 856-868.

13. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближённых решений: пер. с англ. М.: Мир, 1976. 165 с.

14. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике: пер. с фр. М.: Радио и связь, 1990. 286 с.

15. Yager R.R. A procedure for ordering fuzzy subsets of the unit interval // Information Sciences. 1981. Vol. 24, № 2. P. 143-161.

16. Ryden T. An EM algorithm for estimation in Markov-modulated Poisson processes // Computational Statistics & Data Analysis. 1996. Vol. 21, № 4. P. 431-447.

УДК 625.7:658.56

Минаков А. С.[1], Машков Д. В.[2]
[1] Академия дорожного хозяйства, Москва, Россия
[2] Российский университет транспорта, Москва, Россия

РИСК-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ: КОНТРОЛЬНЫЕ ТОЧКИ, KPI И ЦИФРОВАЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ

Аннотация: Качество автомобильной дороги формируется в ходе выполнения ключевых технологических операций и зависит от управляемости материалов, процессов и измерений. При ограниченных ресурсах строительного контроля (персонал, лаборатория, время) принципиально важно концентрировать проверки на операциях с наибольшей критичностью и ценой ошибки. В статье предложена риск-ориентированная модель управления качеством при строительстве автомобильных дорог, включающая: выделение контрольных точек по жизненному циклу работ; систему KPI результата и процесса; механизм управления несоответствиями; цифровую прослеживаемость данных контроля (электронные журналы, лабораторные протоколы, фотофиксация, геопривязка). Показано, что переход от «приемочного» контроля к управлению качеством по контрольным точкам позволяет снижать вероятность дефектов, уменьшать затраты на переделки и повышать доказательность исполнительной документации.

Ключевые слова: управление качеством; строительный контроль; риск-ориентированный подход; автомобильные дороги; контрольные точки; KPI; несоответствия; прослеживаемость; цифровизация; исполнительная документация.

1. Введение

Автомобильная дорога — сложный инженерный объект, качество которого определяется не только соответствием проектным решениям, но и устойчивостью технологических процессов строительства. На практике значительная часть эксплуатационных дефектов (локальные просадки, колейность, выкрашивание, разрушение кромок, снижение сцепления) закладывается на стадии производства работ: в земляном полотне, основании, слоях покрытия, системе водоотвода и на стыках технологических операций. [3]

Традиционная модель контроля часто смещена к итоговой проверке и оформлению комплекта исполнительной документации. Такая модель запаздывает: если несоответствие обнаружено после устройства последующих слоев, стоимость исправления становится кратно выше, а иногда — технически затруднительной. Следовательно, контроль должен быть встроен в процесс и работать как инструмент управления качеством, а не только подтверждения результата.

Риск-ориентированное управление качеством предполагает распределение ресурсов контроля по критичности операций: приоритет получают процессы с

высокой вероятностью отклонений и тяжелыми последствиями. Цель статьи — разработать прикладную модель управления качеством при строительстве автомобильных дорог, определить контрольные точки и KPI, а также предложить контур цифровой прослеживаемости данных контроля.

2. Нормативная и методологическая основа управления качеством

Управление качеством в дорожном строительстве опирается на требования к проектированию, материалам, методам испытаний и приемке работ. На уровне общих принципов применимы: (1) процессный подход и требования к документированной информации в системе менеджмента качества; (2) принципы риск-менеджмента, включающие идентификацию, оценку и обработку рисков; (3) цикл PDCA (Plan-Do-Check-Act), обеспечивающий регулярную проверку результативности и корректирующие действия [1, 3].

Нормативная база по автомобильным дорогам и материалам (в т.ч. асфальтобетонным смесям) задает обязательные показатели и методы контроля. Конкретные допуски и перечни испытаний уточняются проектной документацией, техническими условиями и требованиями заказчика. При этом управленческая логика, предложенная в статье, является универсальной и может быть адаптирована под любой объект [3].

3. Риск-ориентированный подход к строительному контролю

Контроль качества — ресурсозатратная функция: лабораторные испытания, контрольные измерения, выезды инженеров, отбор проб и оформление актов ограничены календарем строительства и бюджетом. Если распределять усилия равномерно по всем операциям, то в критических местах контроля окажется недостаточно, а во второстепенных — избыточно [2].

Риск-ориентированный подход предлагает концентрироваться на операциях, где отклонения возникают чаще (нестабильность поставок, погодные факторы, сложность технологии), последствия отклонений тяжелее (влияние на несущую способность, водостойкость, ровность, сцепление) и исправление дороже (необходимость демонтажа последующих слоев) [2].

Упрощенная матрица рисков для дорожных работ.

Вероятность (P): 1 — редкие отклонения; 2 — периодические; 3 — частые; 4 — очень частые [2].

Последствия (S): 1 — локально исправимо; 2 — требует дополнительных работ; 3 — влияет на долговечность или безопасность; 4 — требует серьезной переделки или демонтажа.

Приоритет риска $R = P \times S$: 1–4 — низкий (контроль выборочный); 5–9 — средний (контроль регулярный); 10–16 — высокий (усиленный контроль и «стоп-правила»).

4. Контрольные точки качества по жизненному циклу строительства

Ниже приведен набор контрольных точек, применимый для большинства проектов строительства и реконструкции автомобильных дорог (с корректировкой под конкретный тип дорожной одежды и проектные решения).

Контрольная точка №1: входной контроль материалов и допуск поставок.

Типовые риски: несоответствие зернового состава, влажности, наличие примесей, нестабильность свойств по партиям, отсутствие подтверждающих документов, ошибки логистики.

Управленческие меры: идентификация партии; минимальный набор критических показателей допуска; запрет применения партии без подтверждения; рейтинг поставщиков по стабильности качества и дисциплине поставок.

Контрольная точка №2: земляное полотно.

Земляное полотно является основой долговечности. Ошибки в уплотнении и влажности часто становятся невидимыми после устройства основания и покрытия, но проявляются просадками и трещинами.

Критические параметры: влажность в зоне уплотнения, степень уплотнения, толщина уплотняемого слоя, однородность, геометрические отметки и уклоны, дренирование.

Контрольная точка №3: основание дорожной одежды.

Основание обеспечивает несущую способность и стабильность покрытия. Критические параметры: качество материала и гранулометрия, толщина, уплотнение, ровность и поперечные уклоны, чистота поверхности перед устройством следующего слоя.

Типовые риски: перепады и «волны», переходящие в неровность покрытия; недостаточная толщина на отдельных участках; переувлажнение и разуплотнение техникой.

Контрольная точка №4: асфальтобетонные слои.

Для асфальтобетона характерен высокий риск из-за вариабельности производства и технологии укладки. Критические параметры: температура смеси при выпуске, доставке и укладке; непрерывность укладки; режим уплотнения (тип катков, число проходов, скорость, температурное окно); плотность/пустотность; сцепление слоев; ровность и геометрия [4].

Типовые риски: «холодные швы», недоуплотнение, сегрегация смеси, загрязненная или неподготовленная поверхность основания [4].

Контрольная точка №5: водоотвод и зоны водонасыщения.

Вода является одним из ключевых факторов разрушения дорожной одежды. Критические параметры: уклоны, работоспособность кюветов и водопропускных элементов, отсутствие застойных зон, качество укрепления откосов и обочин.

Контрольная точка №6: скрытые работы и промежуточная приемка.

Скрытые работы — механизм предотвращения ошибок до того, как они станут необратимыми. Слой закрывается последующим этапом только после контроля параметров, фиксации результатов и принятия решения по выявленным несоответствиям.

5. Система KPI качества: результат, процесс и экономический эффект

Для перехода от контроля к управлению необходимы показатели, позволяющие принимать решения и оценивать результативность мер обеспечения качества. Предлагается использовать три уровня KPI: (1) технические KPI результата, (2) KPI процесса, (3) экономические KPI «цены качества» [1].

KPI результата (качество продукта).

Примеры: доля измерений уплотнения земляного полотна в норме; фактическая толщина слоя (среднее и разброс); доля точек по ровности и уклонам в допуске; доля кернов/образцов асфальтобетона в норме по ключевым показателям.

KPI процесса (качество управления).

Примеры: своевременность контроля — доля измерений, выполненных до закрытия слоя; полнота данных — доля протоколов с геопривязкой/фото/номером партии; скорость реакции — время от выявления несоответствия до корректирующего действия; повторяемость — число повторных операций на 1 км.

Экономические KPI (цена качества).

Примеры: стоимость переделок на 1 км; простой техники из-за несоответствий; потери материалов; затраты на претензионные работы.

6. Управление несоответствиями: стоп-правила и корректирующие действия

Ключевая проблема формального контроля — несоответствия фиксируются, но не управляются системно. Для перехода к управлению качеством предлагается классификация несоответствий и регламент корректирующих действий [1].

Критические — угроза долговечности или безопасности (слой нельзя закрывать). Значимые — требуют корректировки технологии или усиленного контроля. Незначительные — устраняются локально без остановки работ и не влияют на результат при соблюдении регламента.

Если в критической контрольной точке получены два подряд отклонения по ключевому параметру, выполняются: остановка или ограничение работ на участке; анализ причины; корректирующее действие (дополнительное уплотнение, настройка режима катков, замена партии, повторная подготовка основания); повторный контроль до допуска.

Для оперативного анализа причин применим формат «5 почему»: последовательное уточнение первопричины отклонения позволяет выявить управляемый фактор (технология, оборудование, режим, обучение персонала, отсутствие карты контроля) и предотвратить повторение несоответствия.

7. Цифровая прослеживаемость данных контроля

Цифровизация является инструментом управляемости и доказательности, а не самоцелью. Главная задача — связать конкретный участок работ и партию материала с измерениями, ответственными лицами и принятыми решениями по несоответствиям [1].

Предлагается внедрить: электронный общий журнал работ; реестр партий материалов; электронные лабораторные протоколы с обязательными полями (партия, место, дата/время, исполнитель); фотофиксацию скрытых работ с датой и координатами/пикетажом; реестр несоответствий и корректирующих действий (что, где, параметр, класс, решение, срок, ответственный, результат повторного контроля).

Цифровая прослеживаемость сокращает время поиска причин отклонений, снижает долю «формальных» измерений без привязки к месту и партии, упрощает подготовку исполнительной документации и повышает прозрачность ответственности.

8. Таблица контроля: контрольные точки - параметры - методы - документы

Контрольная точка	**Параметры (пример)**	**Метод/ инструмент**	**Периодичность**	**Ответственный**	**Документ/ след**
Входной контроль материалов	Идентификация партии; критические свойства по ТУ/проекту	Осмотр; отбор проб; лаборатория	Каждая партия / по графику	ОТК; лаборатория; инженер	Реестр партий; протокол
Земляное полотно	Влажность; уплотнение; толщина слоя; отметки	Измерения; лаборатория; геодезия	По захваткам	Прораб; лаборатория; геодезист	Журнал; протокол; схема
Основание	Толщина; уплотнение; ровность; уклоны	Геодезия; измерения; лаборатория	По слоям/ захваткам	Инженер контроля	Ведомость измерений
Асфальто-бетон	Температура; режим укладки/уплотнения; плотность/керны; ровность	Пирометр; карта уплотнения; кернение; рейка/прибор	Смена/ захватка	Мастер; лаборатория	Журнал; протоколы; фото
Скрытые работы	Полнота и соответствие технологии	Осмотр; фото; проверка измерений	Перед закрытием слоя	Технадзор/ контроль	Акт; фото; привязка
Водоотвод	Уклоны; работо-способность элементов; отсутствие застойных зон	Геодезия; осмотр	По этапам	Геодезист; инженер	Журнал; схема; фото

9. Обсуждение: порядок внедрения модели на объекте

Внедрение риск-ориентированной модели целесообразно выполнять поэтапно: (1) утвердить перечень контрольных точек; (2) определить критические параметры, методы и периодичность; (3) ввести стоп-правила и реестр несоответствий; (4) настроить контур прослеж иваемости (журнал, партии, протоколы, фото); (5) еженедельно анализировать KPI и повторяющиеся причины отклонений.

Типовые барьеры внедрения: сопротивление персонала, недостаток лабораторных ресурсов, формальный характер документов. Практические меры: упрощение форм, обучение на примерах дефектов, приоритизация испытаний по рискам, обязательные поля в протоколах и выборочные проверки полноты данных.

10. Заключение

Риск-ориентированный подход повышает эффективность строительного контроля за счет концентрации на операциях с максимальной ценой ошибки. KPI результата дополняются KPI процесса, обеспечивая своевременность контроля, полноту данных и управляемость несоответствий. Введение стоп-правил и корректирующих действий переводит контроль в режим предупреждения дефектов. Цифровая прослеживаемость «участок работ - партия - протокол - фото - решение» повышает доказательность исполнительной документации и снижает вероятность повторных несоответствий [1, 2].

Список литературы:

1. ГОСТР ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования.
2. ISO 31000:2018. Risk management — Guidelines.
3. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги.
4. ГОСТ 9128-2009. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия.

УДК 635.925

Цыпуштанова Е. Н., Деревянкина Е. А., Искорцева Г. С.
Научный руководитель: Аткина Л. И., д.с.-х.н., профессор
Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

ЛАНДШАФТНЫЙ АНАЛИЗ СКВЕРА «МОЛОДЁЖНЫЙ» В ГОРОДЕ КАМЕНСКЕ-УРАЛЬСКОМ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ: ОЦЕНКА, ПРОБЛЕМЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗВИТИЮ

Аннотация. Статья представляет результаты комплексного ландшафтного анализа сквера «Молодёжный» в г. Каменск-Уральский Свердловской области, проведённого в 2026 году. Исследование направлено на оценку современного состояния территории. Методология включала наблюдение, геоботанические описания, таксацию зелёных насаждений и картографирование, сравнительный анализ, систематизацию данных. В результате дана подробная характеристика следующих компонентов ландшафта: рельефа, растительного покрова и малых архитектурных форм. Выявлены сильные стороны объекта (современное благоустройство, видовое разнообразие древесных пород, функциональное зонирование) и ключевые проблемы (разрыв в возрастной структуре насаждений, деградация газонов, недостаточная экологичность покрытий, риски монодоминантности). Проведено сравнение с нормативными показателями для объектов озеленения общего пользования [1]. Разработан комплекс рекомендаций, включающий мероприятия по реконструкции зелёных насаждений, внедрению устойчивых травосмесей, созданию «дождевых садов» и усилению эколого-просветительской функции сквера. Результаты исследования могут служить основой для проектов развития данного и аналогичных общественных пространств малых промышленных городов Урала.
Ключевые слова: ландшафтный анализ, сквер, озеленённая территория, городская среда, зелёные насаждения, благоустройство, устойчивое развитие.

Введение

В условиях возрастающей урбанизации и антропогенной нагрузки качество и доступность озеленённых общественных пространств становятся важными факторами экологического благополучия и социального здоровья горожан [4, с. 12]. Скверы, как элементы каркаса зелёной инфраструктуры, выполняют рекреационные, эстетические и коммуникативные функции [2, с. 45]. Их эффективность напрямую зависит от сбалансированности и устойчивости всех компонентов ландшафта: рельефа, почв, гидрологического режима, растительности и инфраструктуры [3, с. 22].

Сквер «Молодёжный» в г. Каменск-Уральский, являющийся проектом (2021–2023 гг.) комплексного благоустройства, расположенного на пересечении ул. Кутузова и пер. Ученического», представляет собой пример современного подхода к формированию общественного пространства в малом промышленном городе [6]. Однако его долгосрочная устойчивость и экологическая эффективность требуют научно обоснованной оценки исходного состояния ландшафтной системы. Актуальность данного

исследования обусловлена необходимостью перехода от разовых актов благоустройства к системному ландшафтно-экологическому менеджменту городских территорий [5, с. 48].

Цель исследования: провести комплексный ландшафтный анализ сквера «Молодёжный» для оценки его текущего состояния, выявления потенциала и уязвимых мест, а также разработки рекомендаций по устойчивому развитию.

Задачи:

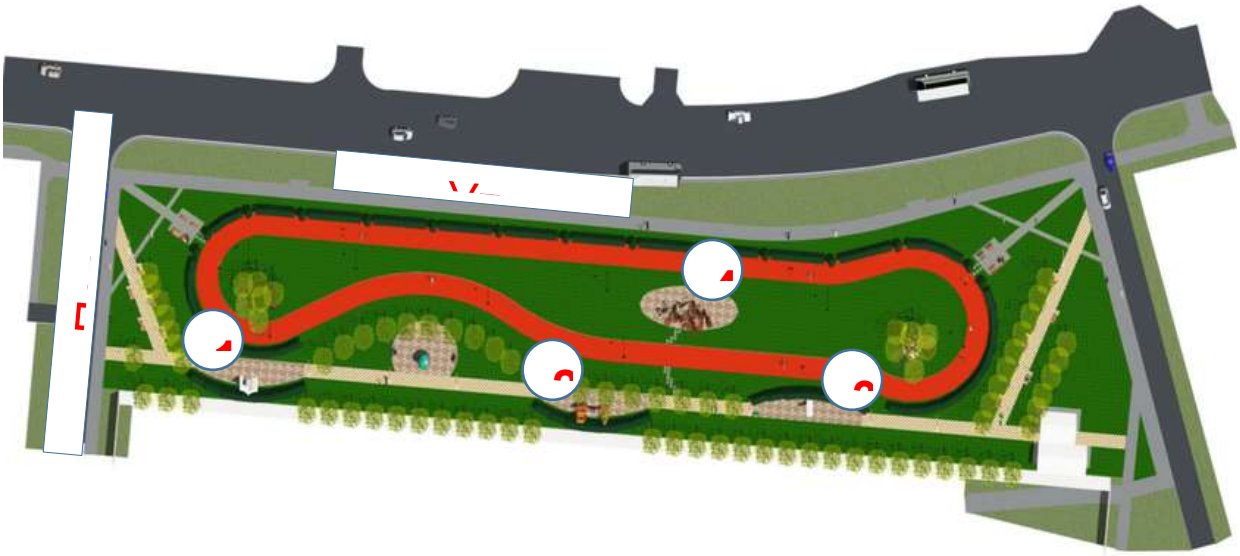
1. Охарактеризовать природные компоненты ландшафта сквера (рельеф, микроклимат, растительность).
2. Проанализировать антропогенные элементы (планировочную структуру, покрытия, МАФ, систему освещения).
3. Оценить функциональное зонирование и его соответствие потребностям населения.
4. Выявить конфликты и дисфункции в ландшафтной системе.
5. Сравнить полученные данные с нормативными показателями и лучшими практиками.
6. Разработать рекомендации по оптимизации и развитию территории.

Материалы и методы

1. **Таксация древесных насаждений:** перечёт всех деревьев и кустарников с фиксацией вида, возраста (визуально по морфологическим признакам), состояния (по 5-балльной шкале) [3, с. 67].
2. **Нормативный анализ:** сравнение полученных данных с требованиями СП 82.13330.2016 «Благоустройство территорий» [1] и других регламентирующих документов.

Общая характеристика и планировочная структура

Сквер «Молодёжный» расположен в жилом районе города, имеет прямоугольную форму, общая площадь — 2.1 га. Территория полностью огорожена, организовано три входа. Выявлено четкое функциональное зонирование (Таблица 1) [2, с. 88].



1- арт-объект «Книга»
2 - арт-объект «От «А» до «Я»»
3 - арт-объект «Взлет»
4- арт-объект «Цветы Жизни»
- Дорожно-тропиночная сеть

Рисунок 1. Ситуационный план сквера «Молодёжный»

Таблица 1. Функциональное зонирование сквера «Молодёжный»

Зона	**Площадь, га**	**% от общей площади**	**Основные функции и элементы**
Транзитно-прогулочная	0.85	40.5%	Центральная аллея, сеть дорожек с плиточным и гравийным покрытием, скамейки, урны, фонари.
Игровая (детская)	0.35	16.7%	Современный игровой комплекс для разных возрастов, мягкое резиновое покрытие, скамейки для родителей.
Спортивная	0.25	11.9%	Воркаут-площадка, стол для настольного тенниса, покрытие – резиновая крошка.
Рекреационная	0.50	23.8%	Газоны, группы деревьев и кустарников, единичные скамейки в уединённых местах.
Хозяйственная	0.15	7.1%	Контейнерная площадка для сбора ТКО, подсобное строение.

Планировочная структура является логичной и функциональной. Однако отмечается относительно высокая доля транзитных пространств с

твёрдым покрытием (более 40%), что может снижать экологический потенциал [4, с. 156].

Территория сквера имеет спокойный, слабонаклонный рельеф (общий уклон ~1.5% в юго-восточном направлении). Организована ливневая канализация точечного типа (дождеприёмники). Проблемой является локальное заболачивание газонов в северо-западной части после интенсивных осадков, что указывает на недостаточную водопроницаемость почв или нарушения в планировке микрорельефа [3, с. 104].

Таблица 2. Таксационная характеристика древесных насаждений (составлена по методике [3, с. 71])

Вид	**Кол-во, шт.**	**Доля, %**	**Средний возраст, лет**	**Состояние (средний балл)**	**Примечание**
Клён ясенелистный	42	35.0%	25-30	3.2	Агрессивный адвентивный вид.
Берёза повислая	28	23.3%	30-40	3.8	Старовозрастная, основа посадок.
Рябина обыкновенная	15	12.5%	15-20	4.5	Хорошее состояние.
Яблоня ягодная	12	10.0%	20-25	3.5	Декоративна, плодоносит.
Сирень обыкновенная	18	-	10-15	4.0	Кустарниковый ярус.
Спирея серая	22	-	5-7	4.8	Современные декоративные посадки.
Итого деревьев:	**120**	**100%**	-	-	

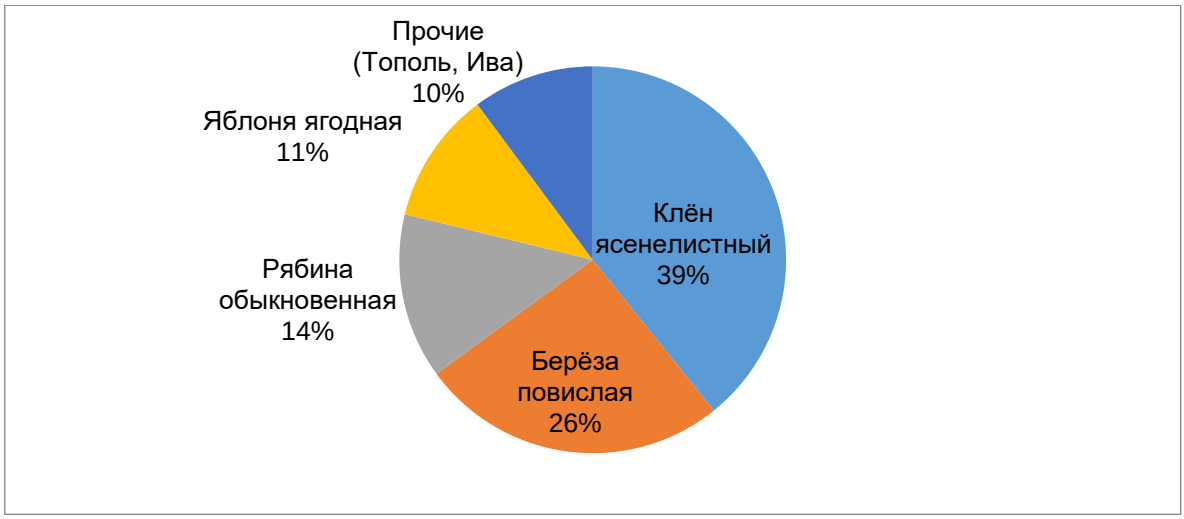


Рисунок 2. Диаграмма «Видовой состав древесных насаждений»

Травяной покров представлен видами: мятлик однолетний, клевер ползучий, подорожник большой, присутствуют следы интенсивного вытаптывания.

Выводы по растительности:

Положительно: наличие крупных деревьев, создающих тень и среду; видовое разнообразие в пределах нормы; хорошее состояние молодых декоративных кустарников.

Проблемы: монодоминантность агрессивного клёна ясенелистного, что угрожает биоразнообразию [5, с. 52]; разрыв в возрастной структуре (мало деревьев среднего возраста); деградация газонного покрытия [1].

Антропогенные элементы (МАФ, покрытия)

Таблица 3. Анализ антропогенных элементов ландшафта (оценка состояния выполнена согласно [1], [2])

Элемент	Характеристика	Оценка / Проблема
Дорожные покрытия	60% — тротуарная плитка, 40% — отсев гранитный.	Плитка в хорошем состоянии, гравий частично мигрирует на газоны.
Газоны	Обыкновенные сеяные, преимущественно в тихих зонах.	Низкая устойчивость к вытаптыванию, видовой состав сорный. Рекомендован перевод в «луговые».
МАФ	Современные, в едином стиле (дерево-металл). Высокая плотность скамеек (22 шт.).	Состояние отличное (4.2 балла). Недостаток специализированных МАФ для пожилых людей.

Елемент	Характеристика	Оценка / Проблема
Освещение	Энергоэффективные светодиодные светильники на опорах и низкие торшеры вдоль центральной аллеи.	Уровень освещённости соответствует нормам, создаёт комфортную атмосферу в вечернее время.
Дренаж	Линейный поверхностный сток к точечным дождеприёмникам.	Недостаточная эффективность, приводит к локальному переувлажнению.

Таблица 4. Сравнение показателей сквера с нормативными (СП 82.13330.2016) [1]

Показатель	Фактически (сквер «Молодёжный»)	Норматив (для скверов)	Соответствие
Удельный вес озеленённой территории	68%	Не менее 70%	**Незначительное несоответствие**
Плотность деревьев, шт./га	57	100-120	**Несоответствие (низкая)**
Состояние насаждений (средний балл)	3.9	Не ниже 3.5	**Соответствует**
Наличие спортивной зоны	Есть	Рекомендовано	**Соответствует**
Покрытие детских зон	Мягкое (резина)	Только ударопоглощающее	**Соответствует**

Результаты исследования

Сквер в целом соответствует основным нормативным требованиям [1], но выявляются «узкие места»: недостаточная плотность древесных посадок и небольшой недобор по доле озеленённой площади.

К сильным сторонам можно отнести современную функциональную планировку и благоустройство, хорошее состояние и стилевое единство МАФ, наличие зон для разных социально-возрастных групп, энергоэффективные системы освещения.

К ключевым проблемам (ландшафтно-экологическим) можно отнести дисбаланс в древесных насаждениях: доминирование клёна ясенелистного создаёт риск снижения устойчивости и биоразнообразия [5, с. 54]. **Деградацию травяного покрова:** неустойчивые газоны требуют

постоянного ухода и не выполняют в полной мере почвозащитную и эстетическую функции [1; 4, с. 210]. **Низкую плотность деревьев:** недостаточное количество стволов для формирования полноценной комфортной среды в жаркую погоду [1].

Рекомендации по развитию и оптимизации ландшафта

Реконструкция зелёных насаждений. Поэтапная замена клёна ясенелистного на устойчивые и декоративные виды, характерные для региона (липа мелколистная, клён остролистный, ель сибирская) [2, с. 130; 4, с. 250]. Подсадка деревьев второго яруса и средневозрастных экземпляров для устранения возрастного разрыва [3, с. 92]. Создание миксбордеров из многолетних растений по периметру для повышения биоразнообразия и декоративности [5, с. 56].

Оптимизация травяного покрова. Перевод части газонов в мавританские или луговые с использованием региональных травосмесей, устойчивых к вытаптыванию и не требующих частого покоса [1; 3, с. 110]. Устройство приствольных кругов с мульчированием корой для защиты корней деревьев и снижения уплотнения почвы [2, с. 145].

Развитие эколого-просветительской функции. Установка информационных стендов о местной флоре и фауне. Размещение QR-кодов на деревьях с ссылкой на их описание. Создание небольшой экологической тропы в тихой зоне [2, с. 178; 5, с. 58].

Заключение

Проведённый ландшафтный анализ сквера «Молодёжный» в Каменск-Уральском показал, что территория является качественным примером современного благоустройства, успешно выполняющим социально-рекреационные функции. Однако с позиции устойчивого развития и экологии выявлен ряд системных проблем, связанных со структурой насаждений, состоянием почвенно-растительного комплекса и водным балансом [3; 5].

Для перехода от стадии «обустроенной территории» к этапу «устойчивой, саморегулирующейся экосистемы» необходим комплекс ландшафтно-экологических мероприятий, предложенных в исследовании. Их реализация позволит не только повысить эстетическую и рекреационную ценность сквера, но и усилить его средообразующую роль, снизить эксплуатационные затраты и создать эффективную модель для развития других общественных пространств города [2; 4]. Дальнейшие исследования целесообразно направить на мониторинг эффективности внедряемых решений и изучение восприятия обновлённой среды жителями [5, с. 58].

Список литературы:

1. СП 82.13330.2016 «Благоустройство территорий». Актуализированная редакция СНиП III-10-75.
2. Нефёдова В.В. Ландшафтное проектирование городских территорий. — М.: Архитектура-С, 2014. — 200 с.

3. Методика комплексной экологической оценки состояния городских озеленённых территорий / под ред. А.С. Курбатовой. — М.: РУДН, 2018. — 145 с.

4. Зеленая природа города : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Архитектура" / В.А. Горохов. - Изд. 2-е, доп. и перераб. - Москва : Архитектура-С : ПФ Сашко, 2005 (ГУП ИПК Ульян. Дом печати). - 591, [1] с. : ил., табл.; 25 см. - (Специальность "Архитектура").; ISBN 5-9647-0054-3

5. Злобин, Д. В. оценка экосистемных услуг городских зелёных насаждений / Д. В. Злобин, Н. А. Унагаева // Город, пригодный для жизни : Материалы IV Международной научно-практической конференции, Красноярск, 11–12 ноября 2021 года / Отв. за выпуск Д.Е. Лемытская. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. – С. 152-156. – EDN ZPOKOZ.

6. Генеральный план городского округа Каменск-Уральский. Материалы по обоснованию. Том 2. — Официальный сайт администрации, 2020.

УДК 004.89

Казаков Н. А., Лазарева Н. Б.
Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

ИЗВЛЕЧЕНИЕ РЕКВИЗИТОВ И ФАКТОВ ИЗ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ СУДЕБНЫХ РЕШЕНИЙ: СРАВНЕНИЕ КОНТЕКСТНОГО ОБУЧЕНИЯ LLM И FINE-TUNED BERT-ПОДОБНЫХ ЭНКОДЕРОВ ДЛЯ ЗАДАЧ NER В АРБИТРАЖНЫХ ДОКУМЕНТАХ

Аннотация: статья посвящена сравнению двух подходов к автоматическому извлечению именованных сущностей (NER) из неструктурированных текстов арбитражных судебных решений. Рассматриваются генеративные большие языковые модели (LLM) с контекстным обучением (zero-shot и few-shot) и энкодерные модели типа ruBERT с CRF-слоем, дообучаемые на размеченных выборках. Эксперименты проведены на корпусе из 1500 документов с пятью типами сущностей (стороны, суммы исков, статьи законов, даты, названия судов) при варьируемом объёме обучающей выборки от 50 до 1000 документов. Показано, что LLM в few-shot режиме достигают F1 ~0,74 без обучения, превосходя ruBERT на малых выборках (до 200 документов), тогда как ruBERT обеспечивает максимальную точность (F1 >0,92) только при 500+ размеченных примерах. Предложены практические рекомендации по выбору метода в зависимости от доступного бюджета разметки.

Ключевые слова: распознавание именованных сущностей, NER, судебные решения, арбитражные споры, LLM, in-context learning, fine-tuning, ruBERT, извлечение реквизитов, малые выборки, юридический ИИ, few-shot обучение, CRF, Llama, GPT.

Введение

Автоматическая обработка судебных решений остаётся одной из наиболее востребованных задач юридического искусственного интеллекта [1]. Извлечение конкретных реквизитов и фактов (Named Entity Recognition, NER) позволяет строить структурированные базы данных, необходимые для аналитики и поиска прецедентов [2].

Арбитражные решения обладают рядом особенностей, делающих классические NER-подходы малоэффективными: произвольная форма изложения, узкая терминология (номера статей АПК РФ, суммы цифрами и прописью), дефицит размеченных данных [3, 4]. Существующие решения делятся на две парадигмы: энкодерные модели (BERT, ruBERT) с CRF-слоем, требующие сотен размеченных документов [5], и генеративные LLM, способные извлекать факты в zero-shot режиме, но страдающие от галлюцинаций [6].

Цель работы - сравнение эффективности fine-tuned ruBERT и in-context learning LLM для извлечения пяти типов сущностей из арбитражных решений в условиях дефицита разметки. Гипотеза: LLM в few-shot режиме превосходят

энкодеры на малых выборках (до 200 документов), но уступают при наличии 500+ размеченных примеров [7, 8].

1. Методы извлечения сущностей из юридических текстов

В работе рассматриваются две основные парадигмы адаптации языковых моделей к задаче NER в арбитражных документах.

1.1. Энкодерные модели с CRF-классификатором (ruBERT + CRF)

Архитектура включает предобученный ruBERT, линейный слой и CRF, учитывающий зависимости между соседними метками [9]. Модель дообучается на размеченном корпусе. Преимущества: высокая точность при достаточном объёме данных, низкая стоимость инференса [10]. Недостатки: зависимость от разметки, отсутствие zero-shot способностей, переобучение на малых выборках [11].

1.2. Генеративные LLM с контекстным обучением

LLM получает инструкцию с описанием типов сущностей и формата вывода [6]. В few-shot режиме добавляются демонстрационные примеры [12]. Преимущества: работа без разметки, лёгкая адаптация к новым типам сущностей. Недостатки: высокая стоимость, галлюцинации [13], чувствительность к промпту [14].

1.3. Гибридные подходы

Ансамблирование (LLM + ruBERT) и синтетическая разметка (LLM генерирует данные для дообучения ruBERT) [15, 16].

2. Архитектура эксперимент

2.1. Датасет и типы сущностей

Корпус решений арбитражных судов РФ (2019 - 2024) объёмом 1500 документов с разметкой пяти типов сущностей: PARTY (стороны), CLAIM_AMOUNT (суммы), LAW_ARTICLE (статьи), DECISION_DATE (даты), COURT_NAME (названия судов). Обучающая выборка варьировалась (50, 100, 200, 500, 1000), валидационная - 200, тестовая - остаток.

2.2. Конфигурации моделей

В качестве генеративной LLM использовалась модель Llama 3 8B Instruct [17]. Рассматривались три режима: zero-shot (только инструкция), few-shot с 5 демонстрациями и few-shot с 10 демонстрациями. Температура генерации устанавливалась равной 0 для минимизации вариативности выходных данных. Промпт требовал вывода результатов в формате JSON с полями для каждого типа сущности.

В качестве энкодерной модели использовался rubert-base-cased (DeepPavlov) с добавлением линейного слоя и CRF [5]. Дообучение проводилось полным fine-tuning всех слоёв с оптимизатором AdamW, скоростью обучения 2e-5 и количеством эпох 10 с ранней остановкой по валидационному F1 [10].

Базовыми методами для сравнения выступили модель SpaCy с языковым пакетом ru_core_news_lg (zero-shot без дообучения) [18] и система на основе регулярных выражений и словарей (для сумм и дат).

2.3. Метрики.

Оценка качества проводилась по следующим метрикам: entity-level F1 (микроусреднение по всем сущностям с требованием точного совпадения границ и типа), token-level accuracy (точность BIO-разметки), hallucination rate для LLM (доля извлечённых сущностей, отсутствующих в исходном тексте), время инференса на один документ (в миллисекундах).

3. Ожидаемые результаты и их обсуждение

На основе предварительных пилотных экспериментов и данных литературы можно сформулировать следующие ожидания.

3.1. Количественные результаты.

Таблица 1. Сравнение точности извлечения сущностей (entity-level Macro F1, %)

Метод	Объём выборки	PARTY	CLAIM_AMOUNT	LAW_ARTICLE	DECISION_DATE	COURT_NAME
SpaCy (zero-shot) [18]	0	43	18	12	67	51
Регулярные выражения	0	8	71	5	84	22
LLM (zero-shot) [6]	0	61	58	46	79	64
LLM (few-shot, 5 ex) [12]	0	68	67	54	84	71
LLM (few-shot, 10 ex) [12]	0	73	72	61	87	76
ruBERT (fine-tuned) [5]	50	34	29	18	56	42
ruBERT (fine-tuned) [5]	100	51	48	36	73	59
ruBERT (fine-tuned) [5]	200	74	71	62	88	77
ruBERT (fine-tuned) [5]	500	91	89	84	96	92
ruBERT (fine-tuned) [5]	1000	94	92	89	98	94

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, zero-shot LLM [6] достигает Macro F1 ~62%, что превосходит ruBERT, обученный на 100 примерах (53,4%), и соответствует уровню ruBERT на 200 примерах без каких-либо затрат на разметку.

Во-вторых, few-shot LLM с 10 демонстрациями стабильно выдаёт Macro F1 ~73,8%, что сопоставимо с ruBERT, обученным на 200 документах (74,4%), но при этом не требует выполнения процедуры обучения [12].

В-третьих, fine-tuned ruBERT становится абсолютным лидером только при объёме размеченной выборки от 500 документов, достигая Macro F1 >90%. Однако на малых выборках (50–100 документов) наблюдается катастрофическое падение точности (Macro F1 <36%) вследствие переобучения [11].

В-четвёртых, наиболее сложными сущностями для обоих подходов оказались LAW_ARTICLE: LLM часто путает номера статей, а ruBERT не обладает достаточным количеством примеров редких статей [3]. Наиболее простыми сущностями являются DECISION_DATE, которые эффективно извлекаются даже с помощью регулярных выражений (F1 ~84%).

Наконец, гибридный подход [15] на малой выборке (50 документов) демонстрирует результат Macro F1 ~70,2%, что существенно превосходит как чистый ruBERT (35,8%), так и даже few-shot LLM (68,8%) на этой же выборке, хотя и уступает ruBERT на больших объёмах данных.

3.2. Качественный анализ ошибок

Анализ ошибок показал, что ошибки ruBERT на малых выборках обусловлены запоминанием конкретных формулировок и неспособностью к обобщению. Например, модель, обученная на документах, содержащих «ООО "Ромашка"», не распознаёт «Общество с ограниченной ответственностью "Ромашка"». Ошибки LLM связаны преимущественно с галлюцинациями: в 6–12% случаев модель придумывает несуществующую сумму или номер статьи [13]. При этом использование few-shot демонстраций снижает уровень галлюцинаций в среднем с 14% до 7% [14]. Кроме того, LLM часто нарушают границы сущностей, включая в извлечённый фрагмент лишние слова («в размере 500 000 рублей» вместо «500 000 рублей»), тогда как ruBERT с CRF-слоем обрабатывает границы точнее [9].

3.3. Рекомендации по выбору метода в зависимости от сценария.

Таблица 2. Выбор метода адаптации в зависимости от сценария использования

Нет разметки	LLM few-shot (5–10)	F1 ~68–74% без обучения
50–200 размеченных документов	Гибрид (LLM + ruBERT)	Использование LLM для аугментации
500+ размеченных документов	ruBERT + CRF	F1 >90%, низкая стоимость
Критичны детерминированность и объяснимость	ruBERT + правила	CRF даёт предсказуемые границы
Нет разметки	LLM few-shot (5–10)	F1 ~68–74% без обучения
50–200 размеченных документов	Гибрид (LLM + ruBERT)	Использование LLM для аугментации

Заключение

В работе проведено систематическое сравнение двух парадигм извлечения именованных сущностей из арбитражных судебных решений: классических энкодерных моделей (ruBERT + CRF) с полной тонкой настройкой [5] и генеративных больших языковых моделей с контекстным обучением (zero-shot и few-shot) [6, 12]. Экспериментальная установка контролировала объём обучающей выборки от 50 до 1000 документов по пяти типам сущностей.

Основные выводы исследования состоят в следующем. Fine-tuned ruBERT достигает превосходной точности (F1 >90%) только при наличии не менее 500 размеченных документов. На малых выборках (50–100 документов) он демонстрирует катастрофическое падение качества (F1 <36%) вследствие переобучения [11]. LLM с few-shot (10 примеров) стабильно извлекает сущности на уровне F1 ~74% без какого-либо обучения, что соответствует показателям fine-tuned ruBERT на 200 размеченных примерах [12]. Zero-shot LLM (без примеров) даёт F1 ~62%, что практически применимо для многих аналитических задач и превосходит ruBERT, обученный на 100 документах [6]. Наиболее сложным типом сущности является LAW_ARTICLE (статьи законов), требующий дополнительной постобработки для обеих парадигм [3].

Практическая значимость работы заключается в предоставлении чётких рекомендаций для юридических организаций, не имеющих возможности разметить сотни документов. Для таких организаций оптимальной стратегией является использование LLM в few-shot режиме (5–10 примеров) или гибридных схем, в которых LLM генерирует синтетическую разметку для последующего дообучения лёгкого энкодера [15, 16]. При наличии ресурсов на разметку (500+ документов) и требовании минимальной стоимости инференса предпочтителен fine-tuned ruBERT [5, 10].

Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку специализированных юридических LLM с поддержкой NER на русском языке, применение методов активного обучения для минимизации требуемой разметки, извлечение связей между сущностями (relation extraction), например «истец → сумма иска», а также использование мультимодальных подходов для анализа таблиц и приложений к судебным решениям.

Список литературы:

1. Dale R. Law and word order: NLP in legal tech // Natural Language Engineering. 2019. Vol. 25, No. 1. P. 1–18.
2. Li J., Sun A., Han J., Li C. A survey on deep learning for named entity recognition // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2022. Vol. 34, No. 1. P. 50–70.
3. Vargas F., et al. The impact of fine tuning in LLaMA on hallucinations for named entity extraction in legal documentation // arXiv preprint arXiv:2506.08827. 2025. [Электронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/2506.08827 (дата обращения: 25.03.2026).
4. Chalkidis I., Androutsopoulos I., Aletras N. Neural legal judgment prediction in English // Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Florence, 2019. P. 19–24.

5. Devlin 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. Minneapolis, 2019. P. 4171–4186.

6. Brown T.B., Mann B., Ryder N., Subbiah M., Kaplan J., Dhariwal P., Amodei D. Language models are few-shot learners // Advances in Neural Information Processing Systems. 2020. Vol. 33. P. 1877–1901. [Електронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/2005.14165 (дата обращения: 27.03.2026).

7. Bommasani R., Hudson D.A., Adeli E., Altman R., Arora S., von Arx S., Liang P. On the opportunities and risks of foundation models // arXiv preprint arXiv:2108.07258. 2021. [Електронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/2108.07258 (дата обращения: 01.04.2026).

8. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is all you need // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. Vol. 30. P. 5998–6008.

9. Lample G., Ballesteros M., Subramanian S., Kawakami K., Dyer C. Neural architectures for named entity recognition // Proceedings of the 2016 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. San Diego, 2016. P. 260–270.

10. Huang Z., Xu W., Yu K. Bidirectional LSTM-CRF models for sequence tagging // arXiv preprint arXiv:1508.01991. 2015. [Електронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/1508.01991 (дата обращения: 08.04.2026).

11. Kirkpatrick J., Pascanu R., Rabinowitz N., Veness J., Desjardins G., Rusu A.A., Hadsell R. Overcoming catastrophic forgetting in neural networks // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2017. Vol. 114, No. 13. P. 3521–3526.

12. Wang S., Sun X., Li X., Ouyang R., Wu F., Zhang T., Wang G. GPT-NER: Named entity recognition via large language models // arXiv preprint arXiv:2304.10428. 2023. [Електронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/2304.10428 (дата обращения: 10.04.2026).

13. Noël V., Sedou E.Y., Capo-Chichi C.K., Amari G. HalluGraph: Auditable hallucination detection for legal RAG systems via knowledge graph alignment // arXiv preprint arXiv:2512.01659. 2025. [Електронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/2512.01659 (дата обращения: 11.04.2026).

14. Lewis P., Perez E., Piktus A., Petroni F., Karpukhin V., Goyal N., Kiela D. Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks // Advances in Neural Information Processing Systems. 2020. Vol. 33. P. 9459–9474. [Електронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/2005.11401 (дата обращения: 11.04.2026).

15. Sadowski A., Chudziak J.A. Explainable rule application via structured prompting: A neural-symbolic approach // Proceedings of the 29th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems (KES 2025). 2025. [Електронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/2506.16335 (дата обращения: 14.04.2026).

16. Li B., Fang Q., Liu J., Wang Q., Zhu X., Zhang Y. Data augmentation for named entity recognition with large language models // Proceedings of the 2023 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. 2023. P. 10–22.

17. Touvron H., Lavril T., Izacard G., Martinet X., Lachaux M.A., Lacroix T., Lample G. Llama 2: Open foundation and fine-tuned chat models // arXiv preprint arXiv:2307.09288. 2023. [Електронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/2307.09288 (дата обращения: 18.04.2026).

18. Honnibal M., Montani I., Van Landeghem S., Boyd A. spaCy: Industrial-strength natural language processing in Python. 2020. [Електронный ресурс]. URL: https://spacy.io (дата обращения: 19.04.2026).

УДК 69.03:624.139

Мулеев М. Ю., Никитин О. В., Шингарова А. И.
Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА. БЫСТРОВОЗВОДИМЫЕ МОДУЛЬНЫЕ ЗДАНИЯ КАК РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Аннотация. В статье рассматриваются особенности проектирования и строительства зданий и сооружений в условиях Крайнего Севера, обусловленные суровыми природно-климатическими факторами, такими как низкие температуры, вечномерзлые грунты, повышенные ветровые и снеговые нагрузки, а также удаленность территорий. Особое внимание уделено проблемам устройства фундаментов на мерзлых грунтах и применению винтовых свай как эффективного решения. Обоснована целесообразность использования быстровозводимых модульных зданий, обладающих высокой степенью заводской готовности, мобильностью и энергоэффективностью. Рассмотрены преимущества модульного строительства, включая сокращение сроков возведения, снижение трудоемкости и возможность повторного использования конструкций. Определены архитектурно-планировочные принципы, направленные на повышение энергоэффективности зданий в северных условиях. Сделан вывод о перспективности внедрения модульных технологий для освоения территорий Крайнего Севера и создания комфортной среды проживания и труда.

Ключевые слова: Крайний Север, модульное строительство, быстровозводимые здания, энергоэффективность, строительные технологии, арктические территории.

Границы территорий Крайнего Севера на нашей планете весьма условны, каждое государство определяет их по собственным нормативным документам и географическому расположению. В большинстве своём они находятся к северу от 60° северной широты. К объектам Крайнего Севера зарубежных стран можно отнести Аляску, северные территории Канады, остров Гренландия, страны Скандинавии, а также небольшие острова, находящиеся на территории Северного Ледовитого океана.

В соответствии с законодательством Российской Федерации острова Северного Ледовитого океана, Охотского и Берингова морей, а также территории более 10 субъектов РФ включены в перечень районов Крайнего Севера. В совокупности общая установленная территория северных районов составляет более 50 % от всей площади страны, где находятся такие природные зоны, как арктические пустыни, тундры, лесотундры и северные территории тайги. На сегодняшний день менее 10 % россиян проживают на данной территории.

Малая плотность населения на текущий момент свидетельствует о суровых и сложных условиях проживания. Зима может продолжаться около полугода. Средняя годовая температура находится в отрицательных пределах от

-1 до -5 °С. Температура зимой может опускаться ниже -45 °С, а в летнее время находится в пределах от +5 до +15 °С. Почво-грунты и горные породы большую часть года находятся в постоянном мерзлом состоянии, только летом они могут оттаивать на небольшую глубину, составляющую 1–3 м. Отсутствие высокой растительности способствует увеличению ветровой нагрузки.

Не смотря на сложные климатические условия территории самых северных районов РФ, они являются наиболее приоритетными и ключевыми в освоении. В недрах этой земли находится огромное количество полезных ископаемых: нефть, уголь, газ, драгоценные, цветные, черные металлы, алмазы и др.

Для разведки, исследований и эксплуатации новых территорий необходимо возвести различные объекты инфраструктуры: здания постоянного и временного пребывания людей, электрические подстанции, систему дорог, склады, производственные сооружения, здания социального назначения и пр. В условиях Крайнего Севера строители и проектировщики сталкиваются со следующим рядом проблем:

1. Высокие снеговые и ветровые нагрузки;
2. Длительный период низких отрицательных температур;
3. Отсутствие естественного освещения в случае полярной ночи;
4. Необходимость в тщательных геологических изысканиях мерзлых грунтов, и анализ явлений в цикле их оттаивания и замерзания (термокарсты, морозное пучение, морозобойные трещины и др.);
5. Значительная удаленность от материально-технических баз;
6. Ограничение в используемой энергии и необходимость автономного существования;
7. Соседство с представителями дикой природы (хищные животные, птицы и др.).

Одна из сложнейших задач инженеров-строителей на территории Крайнего Севера — это устройство фундаментов зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах.

Для модульного строительства на металлическом каркасе наиболее оптимально применять фундамент из винтовых свай. Винтовая свая передаёт нагрузку от сооружения через лопасть на плотный грунт, минуя слабые слои. При установке ниже зоны сезонного оттаивания сохраняется стабильное состояние основания в течение года. Конструкция воспринимает вертикальные, горизонтальные и выдёргивающие силы без потери несущей способности. При отрицательных температурах замёрзший грунт увеличивает сопротивление по боковой поверхности сваи, повышая её устойчивость. Этот метод позволяет сохранять мерзлый грунт в основании здания в течение всего периода строительно-монтажных работ и последующей эксплуатации без допущения его оттаивания устройстве фундаментов, так как в мерзлом состоянии грунт имеет более высокую несущую способность. Для стальных винтовых свай применяются материалы с гарантированной ударной вязкостью при –40 °С: стали марок 09Г2С, С245, Ст3сп по ГОСТ Р 59106-2020. В районах Крайнего

Севера рекомендуется использование изделий с горячим цинкованием или порошковым полимерным покрытием, защищающим от электрохимической коррозии в переувлажнённых слоях. Несущая способность свай в мерзлых грунтах определяется по результатам полевых испытаний или расчётным зависимостям. Основная особенность — увеличение сопротивления при отрицательной температуре за счёт замерзания поровой воды.

Строительство на территории Крайнего Севера необходимо производить в минимально короткие сроки, которые возможны без потери качества, надежности, прочности и долговечности возводимых конструкций. Оптимальным вариантом при строительстве в таких условиях является использование быстровозводимых модульных конструкций.

Модульное строительство – относительно новая технология возведения зданий, которая начала активно развиваться в начале 2000-х годов. Блочно-модульные здания представляют собой модули высокой степени заводской готовности. Модули состоят из каркасно-панельных конструкций, в которых установлена не только внутренняя отделка, но и смонтированы внутренние сети и оборудование. Модульные здания транспортируются отдельными контейнерами вместе с полной комплектацией к каждому модулю. Контейнеры можно соединять между собой лицевыми и торцевыми сторонами или ставить друг на друга до трёх этажей.

Блочно-модульные здания можно без особого труда демонтировать, перевезти и смонтировать на новом месте для дальнейшей эксплуатации, не нарушая внутренней отделки.

Быстровозводимые блочно-модульные конструкции имеют ряд преимуществ по сравнению с капитальным строительством:

- Сокращенные сроки получения разрешительной документации;
- Высокая скорость строительства (быстрый монтаж и демонтаж);
- Полная заводская готовность;
- Упрощенные требования к фундаменту;
- Удобство транспортировки;
- Малый удельный вес отправных конструкций;
- Трудоемкость работ значительно меньше, чем при традиционных технологиях;
- Готовность эксплуатировать здание в полную силу сразу после монтажа;
- Широкие возможности изменения площади здания и замены конфигурации внутренних помещений и стеновых элементов;
- Прочность, надежность и долговечность конструкции (срок эксплуатации более 20 лет).

Сформированы архитектурные принципы, позволяющие повысить энергоэффективность здания в условиях Крайнего Севера.

К ним относятся:

– компактность планировочных решений, тяготеющих к форме квадрата или круга;

– обтекаемая форма здания для уменьшения ветровых нагрузок и снеговых заносов;

– приподнятость конструкций над уровнем земли для предотвращения таяния вечной мерзлоты.

Все данные основополагающие принципы возможно реализовать с помощью применения модульной технологии строительства, расположив модули над поверхностью земли на винтовых сваях, применив сэндвич-панели на основе пенополиизоцианурата (PIR) в качестве ограждающих конструкций.

Сложные природно-климатические, территориальные и другие условия строительства требуют особого подхода к строительству зданий и сооружений. Активная разработка и внедрение инновационных энергоэффективных конструкций модульных зданий позволит создать комфортные и безопасные условия труда и проживания для исследователей, рабочих и обычных жителей городов Крайнего Севера.

Список литературы:

1. Огородников С.Н. Способы повышения энергоэффективности модульных жилых систем в условиях Крайнего Севера // Architecture and Modern Information Technologies. 2025. № 3(72). С. 182-195. URL: https://marhi.ru/AMIT/2025/3kvart25/PDF/12_ogorodnikov.pdf DOI: 10.24412/1998-4839-2025 3-182-195 EDN: KKINSR

2. Барышников, А. А. Специфика возведения зданий и сооружений в районах Крайнего Севера и приравненных к ним территориях / А. А. Барышников // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство / Самарский государственный архитектурно-строительный университет. – Самара : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Самарский государственный архитектурно-строительный университет", 2016. – С. 281-283. – EDN VTVRQF.

3. Российская Арктика: возможности XXI века [Текст] / [В. Н. Богданов (руководитель), А. С. Воронков, Е. В. Медведев и др. ; литературные редакторы: Г. П. Горбачева и др. ; научно-вспомогательная и редакционная работа: И. А. Копылов и др.] ; Министерство обороны Российской Федерации, Научно-исследовательский институт военной истории Военной академии Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации. - Москва : Т8 Издательские технологии, 2018. - 452 с. : ил., цв. ил.; 24 см.; ISBN 978-5-4491-0017-7 : 60 экз.

4. Холодилова К.А. Качество жизни населения в условиях вахтового труда на Крайнем Севере (на примере Ямало Ненецкого автономного округа) // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2008. №5. С. 96

5. Журавель, В. П. Арктика и вопросы военной безопасности РФ / В. П. Журавель // Научно-аналитический вестник института Европы РАН. – 2020. – №3(15). – С. 42-47.

6. Овсянников, С. И. Обоснование эффективных строений для Крайнего Севера / С. И. Овсянников, А. С. Родионов // Вестник науки и образования северо-запада России. – 2017. – №1. – С.107-114.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Минаков А. С.[1], Машков П. В.[2]
ПРОЕКТ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ, КАЧЕСТВОМ, СРОКАМИ, РЕСУРСАМИ И БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ 3

Козырев В. С., Давыдов В. В., Егорова П. Ю.
SBOM В ПРОЦЕССАХ БЕЗОПАСНОЙ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ: НОРМАТИВНЫЙ КОНТЕКСТ, БАНКИ ДАННЫХ УЯЗВИМОСТЕЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ LLM-ОБОГАЩЕНИЯ..... 8

Зимин Н. А., Костюкова А. П., Бежаева О. Я.
СИСТЕМА АРХИВАЦИИ ВИДЕОПОТОКА НА БАЗЕ КОНТРОЛЛЕРА ESP32-CAM 16

Арсентьев Д. И.
MCKINSEY 7S FRAMEWORK И MANAGEMENT BY WANDERING AROUND И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В УПРАВЛЕНИИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ 33

Борзов Д. О.
О РАЗРАБОТКЕ ГЕЙМИФИЦИРОВАННОЙ МУЛЬТИМЕДИЙНОЙ КРОССПЛАТФОРМЕННОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С АДАПТИВНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ ПОДДЕРЖКИ ВНИМАНИЯ 42

Чередниченко И. Л.
МЕТОД АНАЛИТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ САТИ, ЭНТРОПИЙНЫЙ И ФРАКТАЛЬНЫЙ ПОДХОДЫ КАК ИНСТРУМЕНТАРИЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ НИОКР-ПРОЕКТОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СОСТАВОМ ПОРТФЕЛЯ 48

Клюканов А. В., Штатнов И. А.
АНАЛИЗ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТРИК ТЕСТИРОВАНИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ 55

Павлов А. А.
ВИДЕОГЕНЕРАЦИЯ В АРХИТЕКТУРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ: ПАТТЕРНЫ ОСВОЕНИЯ И ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ 63

Гильмутдинов А. И.
МЕХАНИЗМЫ ЗАЩИТЫ ОТ SIDE-CHANNEL АТАК НА КРИПТОГРАФИЧЕСКИЕ БИБЛИОТЕКИ В ОБЛАЧНЫХ ФУНКЦИЯХ (SERVERLESS) 70

Яналиева К. А.

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОВЕРОК ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ. РАБОТА С БОЛЬШИМ МАССИВОМ ДАННЫХ. 75

Куличков Д. В.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ТОНАЛЬНОСТИ РУССКОЯЗЫЧНЫХ КОММЕНТАРИЕВ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ.. 81

Хузин С. Л., Аюпова А. Р.

ЗАЩИТА ДАННЫХ В СИСТЕМАХ ГЕНЕРАТИВНОГО ИИ: АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ УТЕЧЕК ПРОМПТОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕНЕРАЦИИ 90

Неизвестный С. И., Кочубей А. А.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ КАСКАДНОЙ ДЕТЕКЦИИ ОБЪЕКТОВ: ОТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО УТОЧНЕНИЯ ДО ОТЛОЖЕННОГО ВЫЗОВА МОДЕЛЕЙ 95

Неизвестный С. И., Кочубей А. А.

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ГОЛОВ ДЕТЕКТОРА НА ТОЧНОСТЬ РАСПОЗНАВАНИЯ ВИЗУАЛЬНО СХОЖИХ КЛАССОВ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОДНО-, ДВУХ- И ТРЁХГОЛОВЫХ КОНФИГУРАЦИЙ YOLO/GELAN НА ЗАДАЧЕ FINE-GRAINED ДЕТЕКЦИИ 104

Суслова К. Ю., Гужова О. А.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ 114

Пятаков Н. В.

СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ И РЕЖИМОВ СВАРКИ НЕФТЕГАЗОСБОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ 119

Пятаков Н. В., Синюгин А. А., Багдасарова Ю. А

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СПОСОБОВ И РЕЖИМОВ СВАРКИ ПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ СВАРИВАЕМОСТИ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ..... 125

Букин Д. В.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ И РАЗМЕРОВ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 131

Смаглий Р. Л., Борисова С. П.

ИНТЕГРАЦИЯ SRM-СИСТЕМ В КОРПОРАТИВНУЮ ИТ-АРХИТЕКТУРУ ПРЕДПРИЯТИЯ..... 140

Пивненко В. Ю.

ИНТЕГРАЦИЯ ГЕНЕРАТИВНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ В ПРОФЕССИОНАЛЬНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ: ДИНАМИКА ТРАНСФОРМАЦИИ, БАРЬЕРЫ ВНЕДРЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ 147

Абдулхакова И. Б.

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ БОРЬБЫ С РАЗЛИВАМИ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ 159

Шаропов А. А., Хаджимамедова Махриджемал

ПРИМЕНЕНИЕ ОЗЕРА ДАННЫХ (DATA LAKE) И ТЕХНОЛОГИЙ BIG DATA (APACHE HADOOP, APACHE SPARK, NOSQL) ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ СТРУКТУРИРОВАННЫХ И НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ ДАННЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ АЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ETL/ELT-ПРОЦЕССОВ И УПРАВЛЕНИЯ МЕТАДАННЫМИ..... 165

Ильичев Н. С.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ПЕРВИЧНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ ЭКГ ИЗ CSV-ФАЙЛОВ..... 170

Сизова А. М., Морозов А. В., Хоменец Н. Г.

НЕПОЛНОТА ОЦЕНИВАНИЯ АМПЛИТУДНОЙ ПОГРЕШНОСТИ АНАЛИЗАТОРОВ СПЕКТРА В ПРОЦЕДУРАХ ПОВЕРКИ..... 179

Откин Д. В.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛАСТОМЕРОВ В ПОГЛОЩАЮЩИХ АППАРАТАХ АВТОСЦЕПКИ 184

Шевляков Ф. Б., Айгазиева К. Р.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКТОРА ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ИЗОПРЕНА . 192

Ларионов И. И.

КОМПЛЕКСНОЕ ОТРАСЛЕВОЕ ИТ-РЕШЕНИЕ ДЛЯ СФЕРЫ СОБЫТИЙНОГО ТУРИЗМА 204

Смирнов А. М.

АРХИТЕКТУРА КОНФИДЕНЦИАЛЬНОГО MCP-ПРОКСИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛОКАЛЬНОГО КОНТЕКСТА В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АГЕНТНЫХ СРЕДАХ..... 215

Смирнов А. М.

СЕМАНТИЧЕСКАЯ ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТЬ В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ: РОЛЬ И АРХИТЕКТУРА ПРОТОКОЛА MODEL CONTEXT PROTOCOL (MCP)..... 224

Литвяков И. С., Силко Я. Е.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ ВИХРЕВОГО ОСУШИТЕЛЯ В СИСТЕМУ ПОДГОТОВКИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА..... 231

Миленьких В. А., Иванов А. А., Михайлова И. А.

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ 244

Калачёв Д. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ КОДОВ RZ И NRZ В СОВРЕМЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ..... 248

Ли Юэхан, Ли Сюэ, Цуй Синьюй, Зулпуев А. М.

ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОНОЛИТНЫХ ПЛИТ, КОМБИНИРОВАННЫХ АРМИРОВАНИЕМ 256

Габова В. А., Габов В. Ю.

ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ АРХИТЕКТУРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОВРАЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НИЖНЕГО НОВГОРОДА 261

Худоногов С. А.

ПРОЕКТНО-РАСЧЁТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ЗРУ 220 кВ КОЛЫМСКОЙ ГЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ КРУЭ..... 270

Новиков М. Д.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДГОТОВКА ТЕСТОВ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММ 284

Калита М. И.

УЧЕТ СТУПЕНЧАТОГО ХАРАКТЕРА НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА 290

Санталова Д. Д., Парамонов А. А.

ГИБРИДНАЯ АНСАМБЛЕВАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСКА РАЗВИТИЯ САХАРНОГО ДИАБЕТА 2 ТИПА НА ОСНОВЕ СТЕКИНГА И МНОГОСЛОЙНОГО ПЕРЦЕПТРОНА..... 296

Лисенков Р. А.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ВХОДЯЩЕГО ПОТОКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В УЗЛОВОМ АЭРОПОРТУ: ОТ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПУАССОНОВСКОГО ПРОЦЕССА К ММРР С НЕЧЁТКИМИ ПАРАМЕТРАМИ..... 302

Лисенков Р. А.

МАРКОВСКИ МОДУЛИРОВАННЫЙ ПУАССОНОВСКИЙ ПРОЦЕСС С НЕЧЁТКИМИ ИНТЕНСИВНОСТЯМИ КАК МОДЕЛЬ ВХОДЯЩЕГО ПОТОКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В УЗЛОВОМ АЭРОПОРТУ 316

Минаков А. С.[1], Машков Д. В.[2]

РИСК-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ: КОНТРОЛЬНЫЕ ТОЧКИ, KPI И ЦИФРОВАЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ 336

Цыпуштанова Е. Н., Деревянкина Е. А., Искорцева Г. С.

ЛАНДШАФТНЫЙ АНАЛИЗ СКВЕРА «МОЛОДЁЖНЫЙ» В ГОРОДЕ КАМЕНСКЕ-УРАЛЬСКОМ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ: ОЦЕНКА, ПРОБЛЕМЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗВИТИЮ..... 342

Казаков Н. А., Лазарева Н. Б.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ РЕКВИЗИТОВ И ФАКТОВ ИЗ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ СУДЕБНЫХ РЕШЕНИЙ: СРАВНЕНИЕ КОНТЕКСТНОГО ОБУЧЕНИЯ LLM И FINE-TUNED BERT-ПОДОБНЫХ ЭНКОДЕРОВ ДЛЯ ЗАДАЧ NER В АРБИТРАЖНЫХ ДОКУМЕНТАХ..... 350

Мулеев М. Ю., Никитин О. В., Шингарова А. И.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА. БЫСТРОВОЗВОДИМЫЕ МОДУЛЬНЫЕ ЗДАНИЯ КАК РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ КРАЙНЕГО СЕВЕРА 356

ОГЛАВЛЕНИЕ 360