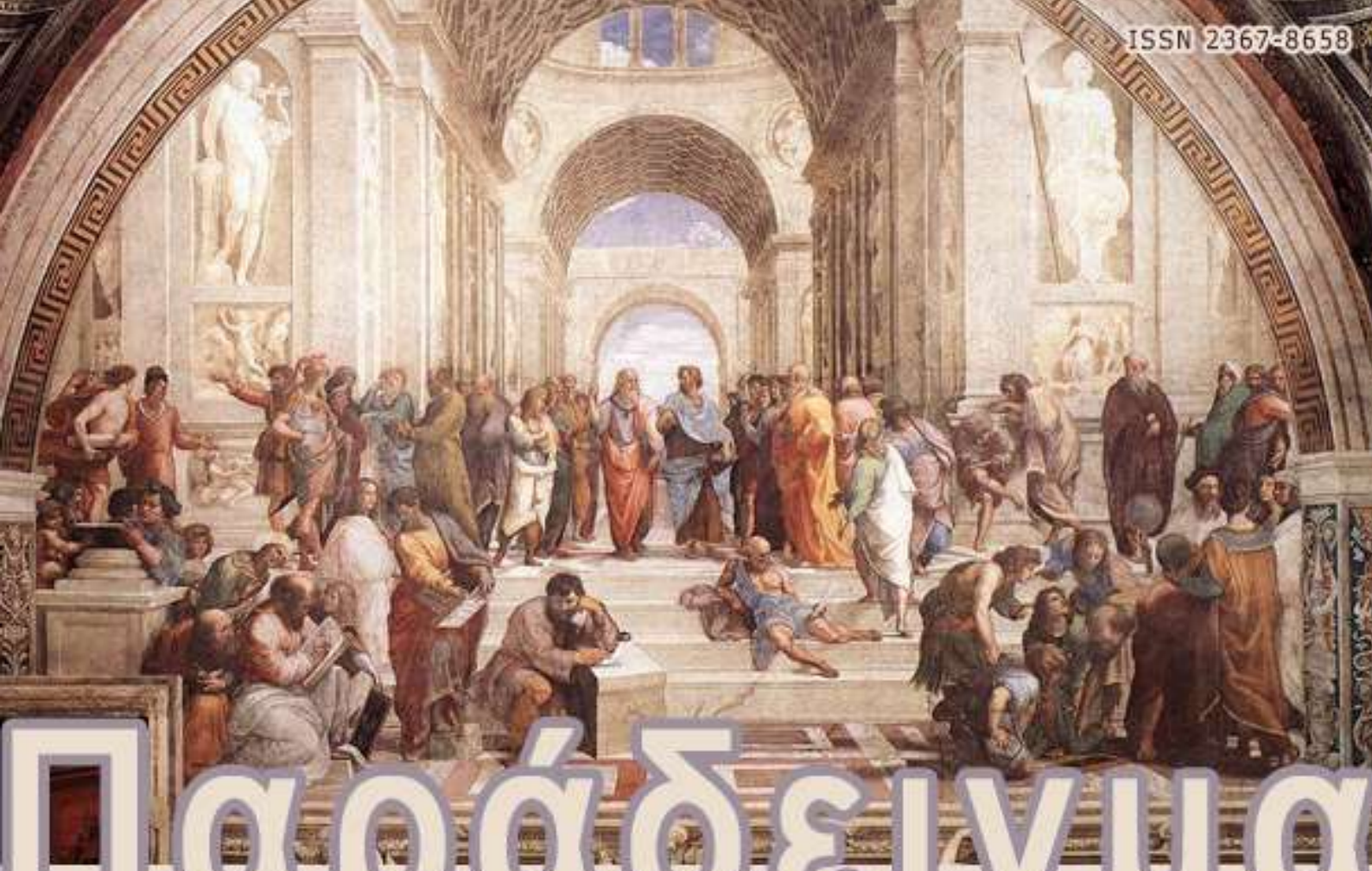
ISSN 2367-8658



Παράδειγμα

Парадигма

Paradigma

№7, 2026
Часть 3

Електронно
научно
списание

Парадигма
Електронно
научно списание

БРОЙ 7/2026
Часть 3

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

www.paradigma.science

ISSN 2367-8658

Договоры на размещение:

Публикационная политика:

Редакционен съвет

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

Главен редактор
Андрей Фурсов

ТЕХНОЛОГИИ

УДК 620.91:621.548:621.311

Керимова Бибихаджар
Государственный энергетический институт Туркменистана, Мары, Туркменистан

ГИБРИДНЫЕ ВЕТРО-СОЛНЕЧНЫЕ УСТАНОВКИ: ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ НЕСТАБИЛЬНОЙ ПОГОДЫ

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы и перспективы оптимизации режимов работы гибридных ветро-солнечных установок (ВСУ) в условиях нестабильной погоды. Проанализированы основные факторы, влияющие на эффективность комбинированной генерации электроэнергии – изменчивость ветрового потока и солнечной инсоляции. Предложены подходы к управлению потоками энергии на основе алгоритмов отслеживания точки максимальной мощности (MPPT) и систем накопления энергии. Показано, что использование гибридных схем позволяет повысить надёжность электроснабжения автономных объектов на 15–20% по сравнению с отдельными ветровыми или солнечными станциями. Особое внимание уделено математическому моделированию переходных процессов и вероятностным методам оценки производительности ВСУ. На основе анализа отечественных и зарубежных исследований сформулированы рекомендации по выбору оптимальных конфигураций оборудования и алгоритмов управления для различных климатических зон.

Ключевые слова: гибридная ветро-солнечная установка, возобновляемые источники энергии, оптимизация режимов работы, нестабильная погода, управление потоками энергии, MPPT-контроллеры, системы накопления энергии, математическое моделирование, автономное электроснабжение.

Введение. Переход к низкоуглеродной энергетике является одним из приоритетных направлений развития мировой экономики. В структуре возобновляемых источников энергии (ВИЭ) наибольший потенциал имеют ветровая и солнечная генерация, однако их широкое внедрение сдерживается фундаментальным недостатком – нестабильностью выработки электроэнергии, обусловленной метеорологическими факторами. Скорость ветра и уровень солнечной радиации подвержены существенным суточным и сезонным колебаниям, что создаёт серьёзные проблемы для обеспечения гарантированного электроснабжения потребителей.

Одним из эффективных способов решения данной проблемы является создание гибридных ветро-солнечных установок (ВСУ), в которых комбинируются два возобновляемых источника энергии. Как отмечается в работе П.Н. Кузнецова, В.В. Чебоксарова и Б.А. Якимовича, «гибридные ветро-солнечные энергетические установки» позволяют существенно повысить

коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) за счёт взаимной компенсации пиков и провалов выработки [1, с. 46]. Действительно, в большинстве регионов ветровой режим и солнечная активность демонстрируют обратную корреляцию: в пасмурную погоду ветер, как правило, усиливается, а в ясные безветренные дни солнечная генерация максимальна.

Однако простое объединение двух источников энергии не решает всех проблем. В условиях резкой смены погоды – шквалистых порывов ветра, прохождения облачных фронтов – возникают переходные процессы, которые требуют применения специальных алгоритмов управления. В связи с этим **целью настоящей работы** является анализ существующих подходов к оптимизации режимов работы гибридных ВСУ и разработка рекомендаций по повышению их эффективности в условиях нестабильной погоды.

Основные факторы нестабильности выработки энергии. Эффективность работы гибридной ВСУ определяется двумя ключевыми параметрами: скоростью ветра и интенсивностью солнечного излучения. Оба этих параметра характеризуются высокой степенью изменчивости как в краткосрочном, так и в долгосрочном периодах.

Солнечная инсоляция зависит от времени суток, угла наклона солнечных лучей, облачности и загрязнения атмосферы. В работе Н.Б. Нагаева, Е.С. Семиной, С.С. Трухачева и др. отмечается, что «перспективы использования возобновляемых источников энергии для питания систем освещения в сельской местности» напрямую связаны с учётом региональных особенностей инсоляции [2, с. 312]. Резкие изменения облачности могут приводить к падению мощности фотоэлектрических панелей на 50–70 % в течение нескольких минут, что создаёт серьёзные проблемы для систем автоматического регулирования.

Ветровой режим также отличается высокой нестабильностью. Скорость ветра может меняться в широких пределах, а её порывистость (турбулентность) вызывает дополнительные динамические нагрузки на конструкцию ветротурбины. Как подчёркивается в исследовании В.В. Чебоксарова и П.Н. Кузнецова, «гибридные ветро-солнечные морские энергетические установки» требуют особого подхода к проектированию, поскольку морские ветры характеризуются повышенной турбулентностью и частыми шквалами [3, с. 70].

Таким образом, нестабильность погоды является главным ограничивающим фактором для широкомасштабного применения ВИЭ. Комбинирование ветровой и солнечной генерации позволяет сгладить пиковые нагрузки, однако для полной компенсации колебаний необходимо применять специальные методы оптимизации режимов работы.

Принципы оптимизации режимов работы гибридных ВСУ. Оптимизация режимов работы гибридной ВСУ предполагает решение комплекса задач, включающих:

- выбор рационального соотношения мощностей ветровой и солнечной частей;
- разработку алгоритмов управления, обеспечивающих максимальное использование доступной энергии;
- интеграцию систем накопления энергии для сглаживания пиковых нагрузок;
- прогнозирование погодных условий для упреждающего регулирования.

Соотношение установленных мощностей ветрогенератора и фотоэлектрических панелей должно определяться на основе климатических данных конкретного региона. В зонах с преобладанием солнечной активности (низкие широты) целесообразно увеличивать долю фотоэлектрических модулей, тогда как в районах с постоянными ветрами – долю ветрогенерации. В работе П.В. Илюшина «Интеграция электростанций на основе возобновляемых источников энергии в Единой энергетической системе России» отмечается, что «оптимальное соотношение мощностей может варьироваться в широких пределах – от 30/70 до 70/30 в зависимости от региона» [4, с. 101].

Ключевым элементом любой ВСУ являются контроллеры отслеживания точки максимальной мощности (Maximum Power Point Tracking – MPPT). Для фотоэлектрических панелей наиболее распространены алгоритмы «возмущения и наблюдения» (P&O) и «инкрементальной проводимости» (IncCond), которые позволяют адаптироваться к изменениям освещённости. Для ветрогенераторов MPPT-алгоритмы ориентируются на поддержание оптимального коэффициента быстроходности при изменении скорости ветра.

В гибридных установках возникает необходимость координации работы двух MPPT-контроллеров. Как показано в исследовании, посвящённом «оптимизации системы автоматического управления точкой максимальной мощности для ветро-солнечной генерирующей установки с накопителями энергии», совместное использование MPPT-алгоритмов позволяет повысить общую эффективность системы на 10–15% по сравнению с раздельным управлением [5, с. 5]. При этом особое внимание уделяется предотвращению конфликтов между контроллерами, когда изменение режима одного источника приводит к неоптимальной работе другого.

Накопители энергии (аккумуляторные батареи, суперконденсаторы) выполняют в гибридной ВСУ две основные функции:

- *Сглаживание краткосрочных колебаний* – аккумуляторы компенсируют резкие провалы выработки при прохождении облаков или шквалистых порывах ветра.
- *Сезонное регулирование* – накопление избыточной энергии в периоды благоприятной погоды для использования в неблагоприятные периоды.

В работе А.Ю. Михайлова, Хэ Хунцзина, Хуан Юнъи и др. «Potential and economic viability of green hydrogen production from seawater electrolysis using renewable energy in remote Japanese islands» рассматривается перспектива использования избыточной энергии для производства водорода, что позволяет решить проблему долгосрочного хранения энергии [6, с. 1440]. Однако для большинства автономных объектов более экономически оправданным является применение литий-ионных аккумуляторных батарей, которые обеспечивают приемлемый баланс между стоимостью, ёмкостью и сроком службы.

Методы математического моделирования и прогнозирования. Для эффективного управления гибридной ВСУ в условиях нестабильной погоды необходимо использовать математические модели, учитывающие вероятностный характер ветрового и солнечного режимов. Наиболее распространёнными подходами являются:

- *Имитационное моделирование* – позволяет оценить поведение системы при различных сценариях погоды на основе многолетних метеоданных.
- *Вероятностные методы* – используются для расчёта надёжности электроснабжения и оптимального резервирования мощности.
- *Методы краткосрочного прогнозирования* – основаны на анализе временных рядов и позволяют осуществлять упреждающее регулирование режимов работы.

В диссертационном исследовании, посвящённом «разработке системы управления и алгоритма повышения эффективности работы гибридных ветро-солнечных электростанций», предложен усовершенствованный алгоритм управления режимами отбора электрической энергии, который учитывает не только текущие показатели выработки, но и прогноз погоды на ближайшие 1–3 часа [7, с. 12]. Такой подход позволяет снизить потери энергии на 8–12 % за счёт более рационального распределения нагрузки между ветрогенератором, солнечными панелями и аккумуляторами.

Техническое обслуживание и ремонт. Специфика гибридных установок заключается в необходимости обслуживания оборудования двух типов – ветрогенераторов и фотоэлектрических модулей, что предъявляет повышенные требования к квалификации персонала. В работе В.Д. Червенчука и А.И. Забудского «К вопросу о специфике технического обслуживания и ремонта гибридных энергетических силовых установок» отмечается, что «основные проблемы эксплуатации связаны с износом механических частей ветрогенераторов и деградацией фотоэлектрических элементов под воздействием ультрафиолета и перепадов температур» [8, с. 106]. Авторы рекомендуют внедрение систем дистанционного мониторинга, позволяющих своевременно выявлять отклонения в работе оборудования и планировать ремонтные работы.

Экономическая эффективность. Экономическая целесообразность применения гибридных ВСУ определяется соотношением капитальных затрат и экономии на топливе (в случае замещения дизельных или бензиновых генераторов). Согласно расчётам, представленным в работе О.А. Символокова «Правовое обеспечение развития технологий использования возобновляемых источников энергии», «введение льготных тарифов и субсидий на оборудование для ВИЭ позволяет сократить срок окупаемости гибридных установок до 5–7 лет» [9, с. 60]. При этом для удалённых и труднодоступных районов, где доставка топлива обходится особенно дорого, гибридные ВСУ могут быть экономически оправданы даже без государственной поддержки.

На основе проведённого анализа можно сформулировать следующие рекомендации по оптимизации режимов работы гибридных ВСУ в условиях нестабильной погоды:

1. **Предварительный анализ климатических данных.** Перед проектированием ВСУ необходимо провести детальный анализ многолетних метеоданных для определения оптимального соотношения ветровой и солнечной мощностей.
2. **Применение гибридных MPPT-алгоритмов.** Рекомендуется использовать координированные алгоритмы отслеживания максимальной мощности, учитывающие взаимное влияние ветрового и солнечного режимов.
3. **Интеграция систем накопления энергии.** Для сглаживания краткосрочных колебаний целесообразно применение аккумуляторных батарей с быстрым временем отклика (литий-ионные, суперконденсаторы).
4. **Внедрение систем прогнозирования.** Использование методов краткосрочного прогнозирования погоды позволяет осуществлять упреждающее регулирование режимов работы и снижать потери энергии.
5. **Организация дистанционного мониторинга.** Установка датчиков контроля параметров работы оборудования и передача данных в центр управления обеспечивает своевременное выявление неисправностей и оптимизацию графиков технического обслуживания.

Заключение. Гибридные ветро-солнечные установки представляют собой перспективное направление развития распределённой энергетики, позволяющее эффективно использовать возобновляемые источники энергии в условиях нестабильной погоды. Комбинирование ветровой и солнечной генерации в сочетании с системами накопления энергии и современными алгоритмами управления обеспечивает повышение надёжности электроснабжения и снижение зависимости от ископаемого топлива.

Проведённый анализ показал, что ключевыми факторами, определяющими эффективность гибридных ВСУ, являются правильный выбор соотношения мощностей источников, применение координированных MPPT-алгоритмов, интеграция аккумуляторных батарей и использование методов

краткосрочного прогнозирования погоды. Как отмечается в работах российских и зарубежных исследователей, внедрение этих подходов позволяет повысить коэффициент использования установленной мощности на 15–20 % и сократить срок окупаемости оборудования до 5–7 лет.

Дальнейшие исследования в данной области должны быть направлены на разработку более совершенных алгоритмов управления, учитывающих не только метеорологические факторы, но и режимы потребления электроэнергии, а также на создание гибридных систем с использованием водородных технологий для долгосрочного хранения энергии.

Список литературы:

1. Кузнецов П.Н., Чебоксаров В.В., Якимович Б.А. Гибридные ветро-солнечные энергетические установки // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 45-53. – DOI 10.22213/2413-1172-2020-1-45-53.
2. Нагаев Н.Б., Семина Е.С., Трухачев С.С. и др. Перспективы использования возобновляемых источников энергии для питания систем освещения в сельской местности // Приоритетные направления научно-технологического развития агропромышленного комплекса России : Материалы Национальной научно-практической конференции, Рязань, 22 ноября 2018 года. Том Часть 1. – Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2019. – С. 310-315.
3. Чебоксаров В.В., Кузнецов П.Н. Гибридные ветро-солнечные морские энергетические установки // Строительство и техногенная безопасность. – 2020. – № 18(70). – С. 67-81.
4. Илюшин П.В. Интеграция электростанций на основе возобновляемых источников энергии в Единой энергетической системе России: обзор проблемных вопросов и подходов к их решению // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2022. – № 4. – С. 98-107. – DOI 10.24160/1993-6982-2022-4-98-107.
5. Оптимизация системы автоматического управления точкой максимальной мощности для ветро-солнечной генерирующей установки с накопителями энергии // Труды МАИ. – [б.г.]. – С. 1-12.
6. Mikhailov A.Yu., Hongjing He, Yongyi Huang et al. Potential and economic viability of green hydrogen production from seawater electrolysis using renewable energy in remote Japanese islands // Renewable Energy. – 2023. – Vol. 202. – P. 1436-1447. – DOI 10.1016/j.renene.2022.12.046.
7. Разработка системы управления и алгоритма повышения эффективности работы гибридных ветро-солнечных электростанций : диссертация ... – [б.м.], [б.г.]. – С. 1-25.
8. Червенчук В.Д., Забудский А.И. К вопросу о специфике технического обслуживания и ремонта гибридных энергетических силовых установок // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2018. – № 3(31). – С. 102-112.
9. Символоков О.А. Правовое обеспечение развития технологий использования возобновляемых источников энергии // Журнал российского права. – 2020. – № 9. – С. 53-67. – DOI 10.12737/jrl.2020.106.

УДК 621.362:620.97:66

Керимова Бибихаджар
Государственный энергетический институт Туркменистана, Мары, Туркменистан

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аннотация. В статье рассматриваются перспективы использования термоэлектрических генераторов (ТЭГ) для утилизации низкопотенциального тепла в промышленности. Низкопотенциальное тепло, образующееся как побочный продукт технологических процессов, составляет значительную долю от общего объёма теряемой энергии на промышленных предприятиях. Традиционные методы утилизации такого тепла часто оказываются экономически неэффективными из-за малого перепада температур. Термоэлектрические генераторы, основанные на эффекте Зеебека, позволяют напрямую преобразовывать тепловую энергию в электрическую без использования промежуточных механических узлов, что делает их привлекательными для утилизации низкопотенциальных тепловых потоков. В работе проанализированы основные принципы работы ТЭГ, их конструктивные особенности, факторы, влияющие на эффективность преобразования, а также рассмотрены примеры промышленного применения. Особое внимание уделено вопросам повышения КПД термоэлектрических систем за счёт оптимизации конструкции, выбора термоэлектрических материалов и режимов охлаждения. Показано, что использование ТЭГ позволяет не только снизить потери энергии и повысить общую энергоэффективность промышленных предприятий, но и уменьшить техногенную нагрузку на окружающую среду за счёт сокращения выбросов углекислого газа и других вредных веществ.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, утилизация тепла, низкопотенциальное тепло, промышленность, эффект Зеебека, термоэлектрический модуль, КПД, добротность, теплообменник, перепад температур, вторичные энергоресурсы, энергосбережение, энергоэффективность.

Введение. Современное промышленное производство характеризуется высоким уровнем энергопотребления, сопровождающимся значительными потерями тепловой энергии. По оценкам экспертов, до 50–60% первичной энергии, потребляемой в промышленности, рассеивается в окружающую среду в виде тепловых отходов. Значительная часть этих потерь приходится на низкопотенциальное тепло – тепловые потоки с температурой не выше 200–250 °C. К таким источникам относятся дымовые газы котельных установок, отработанные газы двигателей внутреннего сгорания, нагретые поверхности технологического оборудования, охлаждающая вода и другие тепловые выбросы.

Проблема утилизации низкопотенциального тепла остаётся одной из наиболее актуальных задач современной энергетики. Традиционные методы рекуперации тепла, такие как использование теплообменников для подогрева воздуха или воды, имеют ограниченную эффективность при малых перепадах температур. Альтернативные технологии, включая органический цикл Ренкина (ОЦР), требуют сложного оборудования и значительных капитальных вложений, что делает их экономически нецелесообразными для многих промышленных объектов.

В этой связи особый интерес вызывают термоэлектрические генераторы – устройства, позволяющие напрямую преобразовывать тепловую энергию в электрическую на основе эффекта Зеебека. ТЭГ не имеют движущихся частей, отличаются высокой надёжностью, длительным сроком службы и возможностью работы в широком диапазоне температур, включая низкопотенциальный диапазон. Эти свойства делают термоэлектрические генераторы перспективным инструментом для повышения энергоэффективности промышленных предприятий и снижения техногенной нагрузки на окружающую среду.

Целью настоящей работы является анализ возможностей и перспектив использования термоэлектрических генераторов для утилизации низкопотенциального тепла в промышленности. В рамках статьи рассматриваются физические принципы работы ТЭГ, факторы, влияющие на их эффективность, конструктивные решения, а также практические примеры внедрения данной технологии на промышленных объектах.

Физические основы работы термоэлектрических генераторов. Термоэлектрические генераторы основаны на эффекте Зеебека, заключающемся в возникновении электродвижущей силы в замкнутой цепи, состоящей из двух разнородных проводников, при создании разности температур между их спаями. В современных ТЭГ используются полупроводниковые термоэлектрические материалы, которые обеспечивают значительно более высокую эффективность преобразования по сравнению с металлами.

Термоэлектрический модуль представляет собой набор последовательно соединённых термоэлементов, каждый из которых состоит из полупроводниковых ветвей p- и n-типа, соединённых металлическими коммутационными пластинами. При нагреве одной стороны модуля и охлаждении другой между горячими и холодными спаями возникает разность температур, которая создаёт градиент электрического потенциала. Возникающая при этом электродвижущая сила пропорциональна разности температур и коэффициенту Зеебека термоэлектрического материала.

Эффективность преобразования тепловой энергии в электрическую в термоэлектрическом генераторе характеризуется безразмерным параметром – добротностью ZT:

$$ZT = (\alpha^2\sigma/\kappa) \cdot T,$$

где α – коэффициент Зеебека, σ – удельная электрическая проводимость, к – теплопроводность материала, Т – абсолютная температура. Чем выше значение ZT, тем больший КПД может быть достигнут. Максимальный теоретический КПД термоэлектрического преобразователя определяется как:

$\eta_{max} = (\eta_{Carnot} \cdot (\sqrt{(1+ZT)} - 1)) / (\sqrt{(1+ZT)} + T_c/T_h)$,

где η_{Carnot} – КПД идеальной тепловой машины Карно, T_h и T_c – температуры горячего и холодного спаев соответственно.

В реальных условиях КПД термоэлектрических генераторов остаётся относительно невысоким – для промышленных термоэлектрических модулей он обычно не превышает 5–8% при работе в низкопотенциальном диапазоне температур. Однако, учитывая, что утилизируемое тепло в противном случае было бы полностью потеряно, даже такой КПД может обеспечить значительный энергетический эффект при массовом внедрении.

Конструктивные особенности термоэлектрических генераторов для промышленного применения. Конструкция промышленного термоэлектрического генератора включает три основных элемента: термоэлектрические модули, горячий теплообменник для подвода тепла от источника и холодный теплообменник для отвода избыточного тепла и поддержания необходимого перепада температур.

Горячий теплообменник предназначен для эффективного сбора тепла от источника и передачи его на горячую сторону термоэлектрических модулей. В зависимости от типа источника тепла (дымовые газы, нагретые поверхности, жидкостные потоки) могут использоваться различные конструкции теплообменников – оребрённые поверхности, пластинчатые теплообменники, тепловые трубы и др. Важным требованием к горячему теплообменнику является обеспечение равномерного распределения температуры по поверхности термоэлектрических модулей для предотвращения возникновения термических напряжений и снижения эффективности.

Холодный теплообменник служит для отвода тепла с холодной стороны модулей и поддержания максимально возможного перепада температур. В большинстве промышленных систем для охлаждения используется вода или воздух. Выбор охлаждающей среды и конструкции теплообменника оказывает существенное влияние на общую эффективность системы. Как показано в работе, изменение расхода охлаждающей воды может значительно влиять на выходную мощность генератора. При этом увеличение расхода воды не всегда приводит к пропорциональному росту мощности – существует оптимальный режим, обеспечивающий наилучший баланс между производительностью и энергозатратами на охлаждение.

Термоэлектрические модули являются ключевым элементом генератора. В промышленных установках обычно используются стандартизированные модули на основе теллурида висмута (Bi_2Te_3), которые обеспечивают приемлемую эффективность в диапазоне температур до 250 °C. Для более

високотемпературных применений могут использоваться материалы на основе свинца, кремния или скандия.

Важной конструктивной особенностью промышленных ТЭГ является их модульность. Возможность наращивания мощности путём добавления дополнительных модулей позволяет гибко адаптировать систему к конкретным условиям эксплуатации и масштабировать её при изменении потребностей производства. Однако, как показывают исследования, увеличение количества модулей не всегда приводит к пропорциональному росту выходной мощности из-за эффекта «уплотнения» – снижения температуры теплообменника при чрезмерной плотности размещения модулей. Так, в экспериментах было показано, что генератор с 20 модулями может производить меньше энергии, чем система с 4 модулями, из-за снижения эффективности теплообмена.

Факторы, влияющие на эффективность термоэлектрической утилизации тепла. Эффективность работы термоэлектрического генератора при утилизации низкопотенциального тепла определяется совокупностью факторов, среди которых можно выделить:

1. **Перепад температур (ΔT).** Это наиболее значимый фактор, определяющий выходную мощность ТЭГ. Чем выше разность температур между горячей и холодной сторонами модуля, тем больше генерируемая электрическая мощность. В низкопотенциальном диапазоне, где температура источника не превышает 200–250 °C, особое значение приобретает эффективное охлаждение холодной стороны модуля.
2. **Термоэлектрические свойства материалов.** Добротность ZT материалов определяет максимально достижимый КПД преобразования. Современные исследования направлены на создание материалов с высокими значениями ZT, что позволит существенно повысить эффективность ТЭГ в низкопотенциальном диапазоне.
3. **Конструкция теплообменников.** Эффективность подвода тепла к горячей стороне модулей и отвода тепла от холодной стороны критически важна для обеспечения максимального перепада температур. Потери тепла в теплообменниках и неравномерность температурного поля снижают общую эффективность системы.
4. **Количество и расположение модулей.** Оптимальное количество термоэлектрических модулей и их пространственное расположение на поверхности теплообменника должны обеспечивать максимальную суммарную мощность при минимальных потерях на теплообмен.
5. **Условия охлаждения.** Режим охлаждения холодной стороны модулей (расход и температура охлаждающей жидкости или воздуха) оказывает существенное влияние на перепад температур и, соответственно, на выходную мощность генератора.

Исследования показывают, что при утилизации низкопотенциального тепла от вертикальных промышленных поверхностей в диапазоне температур

100–350 °C и при расходе охлаждающей воды 150–250 дм³/ч максимальная достигнутая выходная мощность составила 12,41 Вт для генератора с 4 модулями. При этом наиболее оптимальным был признан расход воды 200 дм³/ч, обеспечивающий наилучший баланс между производительностью и потреблением ресурсов.

Применение термоэлектрических генераторов в различных отраслях промышленности. Термоэлектрические генераторы находят применение в различных отраслях промышленности для утилизации низкопотенциального тепла. Наиболее перспективными направлениями являются:

Нефтеперерабатывающая промышленность. На нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) образуется значительное количество низкопотенциального тепла – отходящие газы печей, нагретые поверхности трубопроводов и оборудования, тепловые потоки от технологических установок. Применение ТЭГ позволяет утилизировать это тепло и преобразовывать его в электроэнергию для собственных нужд предприятия, повышая общую энергоэффективность и экологическую безопасность производства.

Металлургия. Металлургическое производство характеризуется высокими тепловыми потерями. Отходящие газы доменных и мартеновских печей, нагретые поверхности прокатных станов и конвертеров являются мощными источниками низкопотенциального тепла. Использование ТЭГ для утилизации этого тепла позволяет не только снизить энергопотребление, но и уменьшить тепловое загрязнение окружающей среды.

Энергетика. Тепловые электростанции (ТЭС) являются одними из крупнейших источников низкопотенциального тепла – сбросная теплота конденсаторов паровых турбин, теплота системы маслоснабжения подшипников, дымовые газы котельных агрегатов. Внедрение ТЭГ для утилизации этих тепловых потоков позволяет повысить общий КПД электростанций и сократить выбросы CO_2.

Цементная и стекольная промышленность. Производство цемента и стекла сопровождается образованием больших объёмов горячих дымовых газов, температура которых часто находится в низкопотенциальном диапазоне после прохождения систем предварительного подогрева. Установка ТЭГ на участках дымоходов позволяет утилизировать остаточное тепло и генерировать дополнительную электроэнергию.

Сельскохозяйственные предприятия. Термоэлектрические генераторы могут использоваться для автономного энергоснабжения слаботочных систем на сельскохозяйственных предприятиях, где имеются источники низкопотенциального тепла – системы вентиляции животноводческих комплексов, установки для сушки зерна, биогазовые установки.

Лесопромышленный комплекс. На лесных терминалах и деревообрабатывающих предприятиях образуется значительное количество низкопотенциального тепла от сушильных камер, котельных установок и

технологического оборудования. Использование ТЭГ позволяет преобразовывать это тепло в электрическую энергию для обеспечения энергоснабжения удалённых объектов.

Экономические и экологические аспекты внедрения ТЭГ. Экономическая эффективность использования термоэлектрических генераторов для утилизации низкопотенциального тепла определяется несколькими факторами:

- **Снижение затрат на электроэнергию.** Генерируемая ТЭГ электроэнергия может использоваться для собственных нужд предприятия, что снижает объём закупаемой электроэнергии из внешних сетей.
- **Сокращение тепловых потерь.** Утилизация тепла, которое в противном случае рассеивалось бы в атмосферу, повышает общую энергоэффективность производственного процесса.
- **Снижение экологических платежей.** Уменьшение объёмов тепловых выбросов и сокращение потребления ископаемого топлива позволяют снизить размер экологических платежей и штрафов.
- **Долгий срок службы и низкие эксплуатационные расходы.** Отсутствие движущихся частей обеспечивает высокую надёжность ТЭГ и минимальные затраты на техническое обслуживание.

Экологическая составляющая внедрения ТЭГ также значительна. Сокращение потребления ископаемого топлива и уменьшение тепловых выбросов способствуют снижению техногенной нагрузки на окружающую среду. Как отмечается в исследованиях, применение ТЭГ позволяет одновременно минимизировать потери энергии и сократить выбросы CO_2. Кроме того, в ряде конструкций термоэлектрических генераторов предусмотрена возможность дополнительной очистки отходящих газов от вредных компонентов, что повышает экологическую безопасность производства.

Перспективы развития и технологические вызовы. Несмотря на очевидные преимущества, широкое промышленное внедрение термоэлектрических генераторов для утилизации низкопотенциального тепла сдерживается рядом факторов:

- **Относительно низкий КПД.** Современные термоэлектрические материалы обеспечивают КПД преобразования не выше 5–8%, что делает ТЭГ менее привлекательными по сравнению с другими технологиями утилизации тепла при высоких перепадах температур. Однако для низкопотенциального диапазона, где альтернативные технологии часто неэффективны, ТЭГ могут быть единственным практическим решением.
- **Высокая стоимость термоэлектрических материалов.** Теллурид висмута и другие эффективные термоэлектрические материалы являются дорогостоящими, что увеличивает капитальные затраты на создание ТЭГ-систем.

- **Ограниченная температурная стойкость.** Большинство промышленных термоэлектрических модулей рассчитаны на работу при температурах не выше 200–250 °C, что ограничивает их применение в более высокотемпературных зонах.

Перспективными направлениями развития являются:

1. **Разработка новых термоэлектрических материалов** с более высокими значениями ZT, включая наноструктурированные материалы, скандатные и силицидные соединения.
2. **Создание гибридных систем**, сочетающих ТЭГ с другими технологиями утилизации тепла (органический цикл Ренкина, тепловые насосы) для максимального использования теплового потенциала.
3. **Оптимизация конструкций теплообменников** для повышения эффективности теплопередачи и снижения термических потерь.
4. **Разработка портативных и мобильных ТЭГ-установок** для использования в удалённых и труднодоступных объектах.

Заключение. Проведённый анализ показывает, что термоэлектрические генераторы являются перспективным инструментом для утилизации низкопотенциального тепла в промышленности. Несмотря на относительно невысокий КПД, ТЭГ обладают рядом преимуществ, делающих их привлекательными для использования в условиях, где другие технологии утилизации тепла экономически нецелесообразны: отсутствие движущихся частей, высокая надёжность, модульность конструкции, возможность работы в широком диапазоне температур и экологическая безопасность.

Наиболее эффективными областями применения ТЭГ являются отрасли с большими объёмами низкопотенциальных тепловых выбросов – нефтепереработка, металлургия, энергетика, цементная и стекольная промышленность. Внедрение ТЭГ на промышленных предприятиях позволяет не только снизить затраты на электроэнергию и повысить общую энергоэффективность, но и уменьшить техногенную нагрузку на окружающую среду за счёт сокращения выбросов CO_2 и других вредных веществ.

Дальнейшее развитие термоэлектрических технологий, связанное с созданием новых материалов с более высокой добротностью, оптимизацией конструкций теплообменников и разработкой гибридных систем, позволит существенно повысить эффективность ТЭГ и расширить сферы их промышленного применения. Учитывая глобальные тенденции к повышению энергоэффективности и снижению выбросов парниковых газов, термоэлектрические генераторы могут стать важным элементом стратегии устойчивого развития промышленности в XXI веке.

Список литературы:

1. Ежов, В. С. Исследование характеристик и расчет основных параметров термоэлектрического генератора с использованием различных типов полупроводников / В. С. Ежов, Д. Н. Тютюнов, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица // Математика и ее приложения в

современной науке и практике : сборник научных статей X Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов, Курск, 20 мая 2020 года. – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 52-58.

2. Куницкая, О. А. Эффективная система преобразования тепловой энергии в электрическую для энергоснабжения лесных терминалов / О. А. Куницкая, А. В. Помигуев // Повышение эффективности лесного комплекса : Материалы Седьмой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием, Петрозаводск, 25 мая 2021 года. – Петрозаводск : Петрозаводский государственный университет, 2021. – С. 104-105.

3. Максимов, Н. М. Изучение характеристик портативного термоэлектрического генератора «ТЭГ-1 Свеча» / Н. М. Максимов // Сельское хозяйство – драйвер развития регионов : материалы международной научно-практической конференции, Великие Луки, 21 апреля 2022 года. – Великие Луки : Великолукская государственная сельскохозяйственная академия, 2022. – С. 126-130.

4. Мобильный источник питания с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую / Ю. Н. Шалимов, В. И. Кудряш, А. В. Звягинцева [и др.] // Альтернативная и интеллектуальная энергетика : Материалы Международной научно-практической конференции, Воронеж, 06–08 декабря 2018 года. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2018. – С. 106-107.

5. Преобразование тепловой энергии в электричество: потенциал и эффективность термоэлектрических генераторов на основе элементов Пельтье / Б. А. Соловьев, Г. К. Гамисония, Г. Е. Димукашева, Д. А. Коломеец // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2024. – Т. 20, № 1. – С. 55-64. – DOI 10.17122/1999-5458-2024-20-1-55-64.

6. Хабиров, Ф. Ф. Разработка термоэлектрического генератора для слаботочных систем сельскохозяйственных предприятий / Ф. Ф. Хабиров, В. С. Вохмин // АПК России. – 2022. – Т. 29, № 4. – С. 490-499. – DOI 10.55934/2587-8824-2022-29-4-490-499.

7. Шалимов, Ю. Н. Модели систем прямого преобразования тепловой энергии в электрическую / Ю. Н. Шалимов, В. И. Корольков, А. В. Руссу // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2018) : Сборник трудов XI международной конференции, Воронеж, 19 сентября – 24 сентября 2018 года / Под редакцией А.П. Жабко, И.Л. Батаронова, В.В. Провоторова; Воронежский государственный технический университет, Московский государственный университет, Санкт-Петербургский государственный университет, Воронежская Военно-воздушная академия, Воронежский государственный университет и др. – Воронеж : ООО "Издательство "Научная книга", 2018. – С. 297-300.

УДК 37.018.43

Гадамов Дурдымырат[1], Деряева Мая[2]
[1]Международный научно-технологический парк Академии наук Туркменистана, Ашхабад, Туркменистан
[2]Туркменский сельскохозяйственный университет имени С. А. Ниязова, Ашхабад, Туркменистан

АГРОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ БАМИИ В УСЛОВИЯХ ТУРКМЕНИСТАНА

Аннотация. В статье представлены результаты полевых исследований по разработке агротехнических приёмов возделывания бамии (*Abelmoschus esculentus* L.) в почвенно-климатических условиях Туркменистана. Опыты проводились в 2024–2026 годах на базе Туркменского сельскохозяйственного университета имени С.А. Ниязова и Ахалского научно-производственного испытательного центра. Изучалось влияние различных доз минеральных удобрений (азотных, фосфорных, калийных) и биогумуса на рост, развитие и урожайность культуры. Установлено, что наивысшая урожайность (120 ц/га) достигнута при совместном внесении полной дозы NPK ($N_{240}P_{130}K_{60}$) и биогумуса (6 т/га). Описаны основные агротехнические элементы: обработка почвы, сроки и способы посева, система удобрений, междурядные обработки, окучивание и поливной режим. Полученные результаты свидетельствуют о высокой адаптивности бамии к местным условиям и перспективности её внедрения в сельскохозяйственное производство Туркменистана как новой пищевой и лекарственной культуры.

Ключевые слова: бамия, Abelmoschus esculentus, агротехника, минеральные удобрения, биогумус, урожайность, Туркменистан, обработка почвы, сроки посева, междурядная обработка.

Введение. Бамия (Abelmoschus esculentus L.), известная также как окра, гомбо или «дамские пальчики», является ценной овощной культурой семейства мальвовых, широко распространённой в странах Африки, Индии, на Ближнем Востоке и в Юго-Восточной Азии. В последние годы эта культура привлекает всё большее внимание исследователей и аграриев благодаря своим высоким пищевым, диетическим и лекарственным свойствам.

Плоды бамии богаты белками, углеводами, органическими кислотами, минеральными солями и витаминами. В свежих коробочках содержатся витамины A, C, B1, B2, B3, B5, B9, E, K, B6, а также кальций, железо, тиамин, фолат и калий. По содержанию белка бамия конкурирует с мясом, а калорийность составляет всего 30–33 ккал на 100 г продукта, что делает её незаменимым компонентом диетического и лечебного питания. Кроме того, бамия обладает гиполипидемической, противовоспалительной, иммуномодулирующей, антибактериальной и противодиабетической активностью. Молодые листья и

семена также употребляются в пищу: незрелые семена заменяют зелёный горошек, а из зрелых готовят один из лучших заменителей кофе.

Цель настоящей работы – разработка научно обоснованных агротехнических приёмов возделывания бамии, обеспечивающих получение стабильно высоких урожаев в почвенно-климатических условиях Туркменистана.

Материалы и методы исследования. Полевая опытная работа проводилась в 2024 году на агрополе Туркменского сельскохозяйственного университета имени С.А. Ниязова, в 2025 году – в Ахалском научно-производственном испытательном центре, а в 2026 году продолжается на той же площадке.

Основная цель научно-исследовательской работы – определение влияния минеральных удобрений и биогумуса на продуктивность бамии в условиях Туркменистана.

Научно-исследовательская работа проводилась методом полевого опыта. Полевой опыт является основным видом агрохимических исследований, в котором в полевых (естественных), то есть приближенных к производственным условиям, изучаются наилучшие способы возделывания сельскохозяйственных, продовольственных и лекарственных культур, улучшения плодородия почв и получения экологически чистой и высококачественной продукции в неразрывной связи с биологическими особенностями растений.

Профессор П.Г. Найдин определил полевой опыт и его цель следующим образом: «Полевой опыт является методом исследования, проводимым на специально отведённом участке в полевых условиях, и его основная цель заключается в изучении влияния количественного воздействия условий или различных приёмов возделывания культур на урожайность как в отдельности, так и в их сочетании».

Основные задачи метода полевого опыта агрохимии в почвенно-климатических условиях нашей страны:

- Проведение агрономических и агрохимических исследований почв на разных полях в различных условиях, на основе достижений агрохимии, мелиорации, земледелия и других наук подготовка научных рекомендаций по улучшению свойств почв и внедрение их в производство;
- В различных почвенно-климатических условиях изучение научно обоснованных экологически допустимых доз, сроков и способов применения удобрений для сельскохозяйственных культур, а также внедрение полученных положительных результатов в производство.

Схема опыта. Опыт является многофакторным (комплексным). В комплексных опытах площади изучаемых факторов различны. Как видно из схемы опыта (таблица 1), делянки первого фактора имеют большую площадь, под них отводятся делянки второго фактора; площадь второго фактора меньше, под

них отводятся делянки третьего фактора, площадь которых ещё меньше. Площадь полос факторов рассчитывается последовательно от последнего фактора. В нашем опыте первый фактор – удобрения, второй – густота стояния растений, третий – срок посева.

В опыте делянки размещались случайным (рандомизированным) методом. Этот метод впервые был предложен П.А. Фишером. Случайное размещение в опыте также называют рандомизированным методом. Слово «рандом» в переводе с английского означает случайный. В этом методе делянки обозначаются номерами и, в отличие от других методов, случайным образом размещаются по соответствующим полосам в разрезе повторений. Данный метод значительно уменьшает ошибки, связанные с последовательным изменением плодородия почвы и другими колебаниями, и даёт лучшие результаты по сравнению с последовательным методом.

Таблица 1. Схема опыта

Крупноделяночные полосы							
Срок посева – весенний	Срок посева – летний						
Среднеделяночные полосы							
Густота между растениями (см)	Густота между растениями (см)						
25	40	25	40				
Мелкоделяночные варианты с удобрениями							
Повторение I	Повторение IV	Повторение I	Повторение IV	Повторение I	Повторение IV	Повторение I	Повторение IV
1 2 3 4 5 6 7 8 9	3 2 1	1 2 3 4 5 6 7 8 9	3 2 1	1 2 3 4 5 6 7 8 9	3 2 1	1 2 3 4 5 6 7 8 9	3 2 1
Повторение II		Повторение II		Повторение II		Повторение II	
4 5 6 7 8 9 1 2 3	4 5 6	4 5 6 7 8 9 1 2 3	4 5 6	4 5 6 7 8 9 1 2 3	4 5 6	4 5 6 7 8 9 1 2 3	4 5 6
Повторение III		Повторение III		Повторение III		Повторение III	
6 7 8 9 1 2 3 4 5	7 8 9	6 7 8 9 1 2 3 4 5	7 8 9	6 7 8 9 1 2 3 4 5	7 8 9	6 7 8 9 1 2 3 4 5	7 8 9

Биологическая характеристика бамии. Бамия образует стержневой, слабо ветвящийся корень. Корневая система в основном расположена в

пахотном слое почвы, однако главный корень способен проникать на глубину более 1,5 метра. Стебель толстый, слабо разветвлённый, достигает в высоту от 40 до 200 см в зависимости от сорта и условий выращивания.

Растение теплолюбивое и светолюбивое. Семена прорастают при температуре почвы не ниже 16°С. Для нормального роста и развития бамии требуются открытые, хорошо освещённые участки и регулярные поливы. Культура предпочитает плодородные рыхлые почвы со слабокислой реакцией, но способна плодоносить в широком диапазоне pH – от 5,5 до 8,0. Бамия положительно отзывается на калийные удобрения и обильные поливы, однако выдерживает непродолжительную засуху.

Предпосевная подготовка почвы и внесение удобрений. На участке, отведённом под посев бамии, до проведения зяблевой вспашки был проведён влагозарядковый полив. Перед вспашкой было подано 156 м³ воды. Для этого были прорыты временные канавы. Перед зяблевой вспашкой влажность почвы составляла 17%, что способствовало проникновению корней в глубокие слои почвы при проведении вспашки.

Внесение удобрений перед вспашкой. В проведённом полевом опыте различные дозы удобрений были испытаны в 9 вариантах и 4 повторениях. В качестве минеральных удобрений использовались: азотное – мочевина (содержание азота 46%), аммиачная селитра (34,6% азота), фосфорное – простой суперфосфат (17% фосфора), калийное – хлорид калия (56% калия).

Варианты опыта:

1. Без удобрений (контроль)
2. N_{120}
3. N_{120} P_{90}
4. N_{120} P_{90} + 6 т/га биогумуса
5. N_{180} P_{90}
6. N_{180} P_{130}
7. N_{180} P_{130} K_{60}
8. N_{240} P_{130} K_{60}
9. N_{240} P_{130} K_{60} + 6 т/га биогумуса

Примечание: биогумус в дозе 6 т/га вносился перед зяблевой вспашкой в первый год закладки опыта.

Нормы внесения удобрений перед вспашкой: вся доза биогумуса и калия, а также фосфор (за исключением 15 кг) вносились под зяблевую вспашку. Применение биогумуса способствует не только увеличению урожайности, но и улучшению плодородия почвы, а также позволяет получать экологически чистую продукцию. По содержанию гумуса биогумус в 4–8 раз превосходит навоз и компосты.

Проведение зяблевой вспашки. Зяблевая вспашка проводилась со следующими целями:

1. Рыхление почвы;
2. Хорошее сохранение влаги, поступающей в почву;
3. Заделка сорняков и их семян, вредителей и болезнетворных микроорганизмов в нижние слои почвы;
4. Для лучшего вымывания солей при промывных поливах;
5. Для лучшего удержания влаги в почве;
6. Улучшение структуры почвы путём разрушения крупных комков и промораживания зимой;
7. Обеспечение воздухообмена в почве.

Зяблевая вспашка проводилась на глубину 35 см трактором JOHN DEERE 8245 с навесным плугом. После вспашки этим же трактором с выравнивателем было проведено тщательное выравнивание поля. Затем были проведены промывные поливы для удаления легкоподвижных солей из почвы.

Весной проведены предпосевные работы (боронование, культивация, прикатывание). Перед весенними работами было внесено 25% годовой нормы азота в виде мочевины.

Посев и уход за посевами. Посев. Для посева трактором МТЗ-80 были нарезаны борозды с помощью бороздореза. Высота гребней – 20–25 см, расстояние между бороздами – 90 см. Перед посевом по гребням проведён полив. После того как вода впиталась, и почва подготовилась, семена бамии были высеяны 28 апреля. Схема посева: 90х40х1 и 90х25х1. Ширина гребня 30 см, на один гребень высевался один ряд. Оптимальная глубина заделки семян – не более 4 см.

Значение посева семян бамии на гребнях:

1. Облегчается полив;
2. Гребень хорошо прогревается, и семена быстро всходят;
3. При обильных осадках вода не задерживается на гребне и стекает в борозды.

Семена бамии взошли в течение 1–2 недель. При весеннем сроке посева схема 90х40 и 90х25. Когда у растений появилось 3–4 настоящих листа, было проведено первое подкормка азотом (25% годовой нормы мочевины) по вариантам. До первого вегетационного полива проведена двукратная междурядная обработка. Междурядная обработка проводилась трактором МТЗ-80 с культиватором.

Значение междурядной обработки:

1. Уничтожение сорняков до их массового роста;
2. Рыхление верхнего слоя почвы;
3. Уменьшение накопления солей в верхнем слое, предотвращение засоления;
4. Обеспечение воздухообмена в почве;
5. Повышение водопроницаемости;

6. Глубокое заделывание удобрений, повышение их эффективности;
7. Повышение активности микроорганизмов в почве.

После первой междурядной обработки проведено прореживание.

Глубина обработки:

При первой обработке глубина лап установлена 6–8 см, защитная зона – 10–12 см.

При второй обработке глубина лап 10–12 см, защитная зона – до 12 см. Ротационные батареи установлены на расстоянии 3–4 см от ряда, глубина 3–5 см. Диски в ряду – 6–8 см в стороне и на глубину 4–6 см. При второй обработке вместо лап были установлены долота.

Глубина окучников: при первой обработке 6–8 см, второй – 8–10 см, третьей – 12–14 см. Защитная зона – 12–14 см. В период цветения расширялась до 14–16 см.

Глубина борозд между гребнями – 12–14 см. В период бутонизации глубина борозд доводилась до 14–16 см, в период цветения – до 18 см. При внесении удобрений заделывали их на глубину 3–4 см ниже дна борозды.

Система подкормок. Для получения высоких урожаев бамии требуется сбалансированное питание. Рекомендуется использовать комплексные удобрения в соотношении NPK 1:05:03 с дополнительной подкормкой азотом во время вегетации.

В наших исследованиях применялась следующая система подкормок:

Первая подкормка – когда растения сформировали 2–3 настоящих листа, было внесено 25% годовой дозы азота в виде карбамида. Подкормка проводилась анкерными сошниками на расстоянии 10–12 см сбоку от ряда на глубину 10–12 см.

Вторая подкормка – в фазе бутонизации проведена карбамидом по центру междурядий с помощью бороздоделателей. В этот период растениям требуется повышенное количество фосфора и калия для формирования цветков и завязей.

Третья подкормка – проведена аммиачной селитрой и оставшимися 15 кг фосфора также по центру междурядий.

В период цветения и плодоношения особенно важны калийные удобрения, способствующие наливу плодов и повышению их качества.

Фенологические наблюдения и урожайность. 14 июня бамия вступила в фазу бутонизации. Высота растений при этом составила 26–30 см. На контрольном варианте (без удобрений) – всего 10 см. Первое цветение и завязывание плодов было отмечено на варианте с совместным применением биогумуса и минеральных удобрений (вариант 9). Первый урожай был получен именно на этом варианте. Длина листовой пластинки составила 12–15 см, ширина – 17–19 см.

Одной из характерных особенностей бамии является то, что толщина листьев верхнего яруса не совпадает с толщиной листьев нижнего яруса: например, толщина листа верхнего яруса – 0,2 мм, а нижнего – 0,5 мм.

Бамия зацвела массово 23 июня и начала плодоношение.

До 15 июля было проведено 7 вегетационных поливов. До первого вегетационного полива проведены две междурядные обработки.

Таблица 2. Фенологические наблюдения и урожайность бамии, 2025 год

Варианты	Высота растений (см)	Диаметр стебля (мм)	Число плодов на одном растении, шт.	Ветвление, шт.	Урожайность, ц/га
Без удобрений (контроль)	57	10,48	10	1	58
N_{120}	65	11,1	14	1	71
N_{120} P_{90}	70	12,24	15	2	82
N_{120} P_{90} + 6 т/га биогумуса	100	21	19	4	102
N_{180} P_{90}	85	17	17	3	85
N_{180} P_{130}	115	21	23	3	90
N_{180} P_{130} K_{60}	120	23,6	28	3	98
N_{240} P_{130} K_{60}	128	24,6	35	3	105
N_{240} P_{130} K_{60} + 6 т/га биогумуса	130	25	43	5	120

Анализ полученных данных показывает чёткую зависимость урожайности бамии от применяемой системы удобрений.

Наименьшие показатели зафиксированы на контрольном варианте (без удобрений): высота растений – 57 см, диаметр стебля – 10,48 мм, число плодов на одном растении – 10, урожайность – 58 ц/га.

Внесение только азотных удобрений (вариант 2, N_{120}) повысило урожайность до 71 ц/га, что на 22,4% выше контроля. Добавление фосфора (вариант 3, $N_{120}P_{90}$) увеличило урожайность до 82 ц/га (+41,4% к контролю).

Наиболее значительный эффект получен при совместном внесении минеральных удобрений и биогумуса. Вариант 4 ($N_{120}P_{90}$ + 6 т/га биогумуса) обеспечил урожайность 102 ц/га – почти вдвое выше контроля. При этом высота растений достигла 100 см, диаметр стебля – 21 мм, число плодов – 19, ветвление увеличилось до 4.

Максимальная урожайность (120 ц/га) получена на варианте 9 ($N_{240}P_{130}K_{60}$ + 6 т/га биогумуса). Этот вариант превзошёл контроль в 2,07 раза. Растения достигли высоты 130 см, диаметра стебля 25 мм, сформировали 43 плода на одном растении при 5 ветвях. Полученные результаты согласуются с данными других исследований, где наивысшая урожайность бамии (до 113

ц/га) была достигнута при совместном внесении полной дозы NPK и биогумуса (6 т/га).

Повышение доз удобрений от N_{120} до $N_{240}P_{130}K_{60}$ (варианты 5–8) давало последовательный прирост урожайности: 85 → 90 → 98 → 105 ц/га. Однако добавление биогумуса к полной дозе NPK (вариант 9) дало скачкообразное увеличение – до 120 ц/га, что свидетельствует о синергетическом эффекте совместного применения минеральных и органических удобрений.

Биогумус, помимо прямого питания растений, улучшает физические и химические свойства почвы, повышает её плодородие, уменьшает затраты на возделывание и позволяет получать экологически чистую продукцию. Применение биогумуса способствует резкой прибавке урожайности (до 30–80%), при этом вегетационный период у растений сокращается на две-три недели.

Заключение. По результатам трёхлетних полевых исследований (2024–2026 гг.) можно сделать следующие выводы:

1. Бамия (*Abelmoschus esculentus* L.) является перспективной культурой для возделывания в почвенно-климатических условиях Туркменистана. Растение демонстрирует высокую адаптивность к местным условиям и способность формировать полноценный урожай.
2. Разработанная агротехника возделывания бамии включает: зяблевую вспашку на глубину 35 см, предпосевной полив (156 м³/га), посев на гребнях по схеме 90×40×1 или 90×25×1, трёхкратную междурядную обработку с постепенным увеличением глубины, систему из трёх подкормок и регулярные вегетационные поливы (до 7 раз за сезон).
3. Наилучшие результаты по росту, развитию и урожайности бамии получены при совместном внесении полной дозы минеральных удобрений $N_{240}P_{130}K_{60}$ и биогумуса (6 т/га). Урожайность при этом достигает 120 ц/га, что в 2,07 раза превышает контрольный вариант (без удобрений).
4. Установлена чёткая положительная корреляция между дозами вносимых удобрений и основными биометрическими показателями: высотой растений, диаметром стебля, числом плодов и ветвлением.
5. Бамия может быть рекомендована для внедрения в сельскохозяйственное производство Туркменистана как новая высокоценная пищевая и лекарственная культура. Её возделывание позволит расширить ассортимент овощной продукции, повысить рентабельность овощеводства и обеспечить население ценным диетическим продуктом.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на сортоизучение, оптимизацию сроков посева и разработку эффективных мер защиты растений от болезней и вредителей в условиях Туркменистана.

Список литературы:

1. Деръяева, М. Корневая система бамии и особенности поглощения питательных веществ из почвы / М. Деръяева // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2025. – Т. 4, № 1. – С. 131-136. – DOI 10.24412/2500-1000-2025-4-1-131-136.
2. Базарова, Г. В центре внимания отечественных ботаников – Бамия / Г. Базарова // Туркменистан: золотой век. – 2022. – 26 августа.
3. Оценка влияния органических удобрений на ростовые и биохимические параметры / // Аграрная наука. – 2024. – № 6. – С. 13-16.
4. Биогумус: экологически чистое биологически активное органическое удобрение // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2023. – № 4. – С. 8-12.

УДК 636.1

Чарыбердиев Какагелди, Ёлдашов Гуванч
Международная академия коневодства имени Аба Аннаева, Аркадаг, Туркменистан

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОПУЛЯЦИОННОЙ ГЕНЕТИКИ В СОХРАНЕНИИ ЧИСТОКРОВНОЙ АХАЛТЕКИНСКОЙ ПОРОДЫ

Аннотация. В статье рассматривается роль современных молекулярно-генетических подходов в сохранении генетического разнообразия и поддержании чистопородности ахалтекинской лошади – одной из древнейших культурных пород. Обоснована необходимость перехода от традиционных генеалогических методов к комплексному популяционно-генетическому мониторингу с использованием ДНК-маркеров (микросателлитов, SNP-панелей, полногеномного секвенирования). Показано, что интеграция данных о структуре аллелофонда, уровнях инбридинга и филогеографических связях позволяет объективизировать селекционные решения, предотвратить потерю уникальных линий и минимизировать риски наследственных патологий. Особое внимание уделяется применению микросателлитного анализа для подтверждения происхождения, оценке эффективности существующих племенных программ и выявлению кандидатных генов, ассоциированных с хозяйственно полезными признаками. Приведены результаты отечественных исследований, демонстрирующие перспективность внедрения генетической паспортизации в практику коневодческих хозяйств.
Ключевые слова: ахалтекинская порода, популяционная генетика, сохранение генофонда, микросателлитные маркеры, SNP-генотипирование, генетическое разнообразие, инбридинг, селекция, ДНК-паспортизация, чистокровное разведение.

Введение. Ахалтекинская порода лошадей по праву считается национальным достоянием и уникальным объектом культурно-исторического наследия. Сформировавшаяся в условиях сурового климата и кочевого быта среднеазиатских племён, она на протяжении тысячелетий сохраняла свои выдающиеся адаптивные качества, выносливость, грациозный экстерьер и особый тип высшей нервной деятельности. Однако в последние столетия, особенно в XX–XXI веках, ареал разведения породы существенно сузился, а её генофонд оказался под угрозой эрозии вследствие ограниченной численности племенного поголовья, неравномерного использования производителей и периодических кризисов в коневодстве. По данным различных авторов, эффективная численность популяции ахалтекинцев нередко опускалась до критических значений, что создавало предпосылки для роста коэффициента инбридинга, утраты редких аллелей и накопления генетических заболеваний. В связи с этим проблема сохранения

чистопородности и генетического разнообразия приобретает не только практическое селекционное, но и общебиологическое, этическое значение.

Традиционные подходы к управлению породой базируются на генеалогическом учёте, анализе линейной принадлежности и оценке экстерьерно-продуктивных качеств потомства. Эти методы, несомненно, сыграли ключевую роль в становлении ахалтекинской породы, однако их разрешающая способность ограничена субъективностью визуальной оценки, неполнотой родословных данных и невозможностью выявить скрытую гетерогенность на молекулярном уровне. Современная популяционная генетика предлагает принципиально иные инструменты, позволяющие заглянуть в «генотипическую суть» каждого животного и популяции в целом. Среди них наиболее доступным и валидированным является микросателлитный анализ – генотипирование по высокополиморфным локусам STR (short tandem repeats). В России этот подход активно применяется для контроля происхождения и идентификации особей; так, в работе Абрамовой и соавторов [2, с. 7–9] было показано, что стандартные ISAG-панели микросателлитов обеспечивают высокую достоверность установления отцовства и материнства у ахалтекинцев, а также позволяют оценить уровень генетической вариабельности в разрезе отдельных линий.

Не меньший интерес представляют однонуклеотидные полиморфизмы (SNP), которые, благодаря своей распространённости по всему геному, открывают возможности для поиска ассоциаций с хозяйственно полезными признаками – резвостью, промерами, устойчивостью к болезням. В исследовании Алексеевой, Абрамовой и Фёдоровой [3, с. 93–101] был проведён анализ резвостных и экстерьерных показателей жеребцов-производителей, при этом авторы косвенно указали на наличие определённых генотипических коррелят, которые в дальнейшем могут быть верифицированы с помощью SNP-панелей. Кроме того, молекулярно-генетические маркеры незаменимы для изучения структуры породы по мастям – Абрамова и Сорокин [1, с. 129–133] продемонстрировали генетическую детерминацию мастей у ахалтекинцев, что имеет не только фенотипическое, но и практическое значение при подборе пар, поскольку некоторые окрасы ассоциированы с определёнными линиями и могут служить косвенными маркерами происхождения.

Важнейшим направлением популяционно-генетического мониторинга является оценка степени инбридинга и эффективного размера популяции. Использование коэффициентов молекулярного инбридинга (на основе гомозиготности по маркерам) даёт более объективную картину, нежели расчёты по родословным, которые нередко содержат пробелы. Карелина и Воронина [4, с. 131–136] дали подробную характеристику производящего состава современных ахалтекинских заводов, отметив значительное влияние

отдельных жеребцов-производителей на последующие поколения. Это подтверждает необходимость регулярного генетического скрининга, чтобы избежать «эффекта основателя» и концентрации вредных рецессивных аллелей. В перспективе полногеномное секвенирование и методы геномной селекции (геномная оценка племенной ценности) могли бы радикально повысить эффективность отбора, однако их внедрение сдерживается высокой стоимостью и отсутствием крупных референсных выборок для породы.

Таким образом, интеграция современных популяционно-генетических методов в селекционную работу с ахалтекинской породой является не просто академическим интересом, а насущной практической задачей. Она позволяет сочетать традиции чистопородного разведения с объективными данными о молекулярном разнообразии, обеспечивая тем самым устойчивое сохранение генофонда для будущих поколений. Цель настоящей работы – обобщить имеющийся отечественный опыт применения ДНК-маркеров для мониторинга генетического здоровья ахалтекинцев, выделить наиболее информативные подходы и наметить перспективы их использования в повседневной племенной практике. В следующих разделах будут подробно рассмотрены методические аспекты микросателлитного и SNP-генотипирования, проанализированы данные по аллелофонду различных линий, а также предложены рекомендации по оптимизации программ сохранения с учётом генетических параметров.

В основе современных популяционно-генетических исследований ахалтекинской породы лежит комплекс молекулярно-биологических и биоинформатических подходов. Наиболее широко применяемым методом остаётся генотипирование по микросателлитным локусам (STR), рекомендованным Международным обществом генетики животных (ISAG). Стандартные панели включают 17–19 маркеров, равномерно распределённых по аутосомам, что обеспечивает достаточную разрешающую способность для идентификации особей, установления родительства и оценки популяционных параметров. Образцы биоматериала (волосы с луковицами или венозная кровь) подвергаются экстракции ДНК, амплификации целевых фрагментов с помощью полимеразной цепной реакции и капиллярного электрофореза. Полученные аллельные профили сравниваются с эталонными базами данных, создаваемыми в рамках племенных программ.

Более высокое разрешение дают однонуклеотидные полиморфизмы (SNP), которые регистрируются с помощью ДНК-чипов высокой плотности (например, Illumina Equine SNP50 BeadChip). Такие панели позволяют охватить до 50–70 тысяч маркеров по всему геному, что открывает возможности для полногеномного поиска ассоциаций (GWAS) с количественными признаками, оценки геномных коэффициентов родства и реконструкции демографической истории популяции. В последние годы всё

большее значение приобретает полногеномное секвенирование (WGS), которое даёт информацию о редких вариантах, структурных перестройках и мутационных нагрузках, однако его рутинное использование в селекционной практике пока сдерживается экономическими факторами.

Для обработки данных применяют стандартные биоинформатические пакеты (PLINK, R/adegenet, STRUCTURE, GCTA), позволяющие вычислять наблюдаемую и ожидаемую гетерозиготность, коэффициент инбридинга (Fis, Fst), эффективный размер популяции (Ne), а также проводить кластерный анализ и филогеографическое картирование. Важным этапом является оценка достоверности происхождения – сравнение генотипов потомков с предполагаемыми родителями исключает ошибки в родословных, которые, по данным некоторых исследований, могут достигать 5–10 % даже в ведущих конезаводах.

Многолетние микросателлитные исследования, проведённые на выборках ахалтекинских лошадей из российских и туркменских хозяйств, выявили достаточно высокий уровень генетического разнообразия, сопоставимый с другими аборигенными породами, однако с выраженной дифференциацией между отдельными линиями. Так, Абрамова с соавторами [2] установили, что значения средней наблюдаемой гетерозиготности (Ho) по 17 локусам составляют 0,68–0,72, а ожидаемой (He) – 0,72–0,76, что свидетельствует о незначительном дефиците гетерозигот и умеренном инбридинге в общей популяции. При этом отдельные линии (например, линия Гелишикли, Араб, Мелекуш) демонстрируют существенные различия в аллельном составе: некоторые маркеры имеют линиеспецифичные аллели, которые могут служить своеобразными «генетическими паспортами». Однако в ряде групп жеребцов отмечено повышение коэффициента инбридинга (Fis до 0,08–0,12), что коррелирует с уменьшением разнообразия по STR-локусам. Это особенно характерно для потомства производителей, интенсивно использовавшихся в течение нескольких поколений, – факт, подтверждаемый анализом производящего состава, проведённым Карелиной и Ворониной [4]. Авторы показали, что ограниченное число племенных жеребцов покрывает до 70 % всех кобыл в отдельных заводах, что неизбежно ведёт к накоплению родственных спариваний и снижению эффективного размера популяции.

Генетическая структура ахалтекинской породы также изучалась через призму маркеров, ассоциированных с фенотипическими признаками. Алексеева, Абрамова и Фёдорова [3] сопоставили резвостные качества и экстерьерные промеры жеребцов-производителей с их родословными, косвенно указывая на возможную наследственную компоненту этих показателей. Использование SNP-панелей позволило бы напрямую выявить локусы количественных признаков (QTL), отвечающих за длину шага, мышечную массу и кардиореспираторную выносливость. В частности, в

зарубежных исследованиях на скаковых породах идентифицированы гены MSTN (миостатин) и COX4I2, влияющие на скоростные качества, – их полиморфизмы могут быть проверены и у ахалтекинцев. Однако, учитывая уникальный исторический путь породы, вероятно, что её адаптивные признаки кодируются иными генетическими сетями, что требует самостоятельных GWAS-проектов. Отечественные данные по мастям [1] показывают, что гены, контролирующие окрас (например, MC1R, ASIP, TBX3), имеют чёткую дифференциацию по линиям: так, гнедая масть преобладает в линии Мелекуша, а серая – в линии Араба. Это не только любопытный эволюционный факт, но и практический инструмент – при подборе пар можно учитывать желаемое сочетание фенотипических классов, избегая нежелательных гомозигот по вредным аллелям, сцепленным с мастью.

Одной из самых острых проблем сохранения чистокровной ахалтекинской породы является угроза инбредной депрессии, проявляющейся в снижении фертильности, жизнеспособности жеребят и устойчивости к инфекциям. Традиционный генеалогический учёт часто не позволяет объективно оценить степень гомозиготности из-за пробелов в родословных (особенно для линий, ведущих начало от туркменских табунов). Молекулярные же маркеры дают прямую оценку «геномного инбридинга» – доли генома, находящейся в гомозиготных участках (ROH). Исследования на других породах показали, что участки длинных гомозиготных сегментов коррелируют с потомством с низкой выживаемостью. Для ахалтекинцев такие данные пока единичны, но их получение представляется крайне актуальным. Внедрение регулярного SNP-генотипирования позволило бы выявлять животных с критическим уровнем ROH и планировать спаривания таким образом, чтобы снизить риск проявления рецессивных заболеваний. Помимо этого, методы популяционной генетики позволяют оценить миграционную историю и степень изоляции породы. Сравнение аллельных частот с другими породами (арабской, чистокровной верховой, местными азиатскими лошадьми) показывает, что ахалтекинцы образуют обособленный кластер, что подтверждает их древнее происхождение и необходимость специальных мер по сохранению идентичности.

Практическая реализация популяционно-генетического мониторинга требует создания единой национальной базы данных ДНК-профилей всех племенных особей. В ряде стран (США, Великобритания) такие базы функционируют на уровне породных ассоциаций и служат основой для выдачи сертификатов происхождения. В России пилотные проекты по генетической паспортизации ахалтекинцев уже запущены в некоторых конезаводах, однако охват пока недостаточен. Основными барьерами остаются стоимость анализа, недостаток квалифицированных кадров в лабораториях и слабое взаимодействие между селекционерами и

молекулярными биологами. Тем не менее, развитие технологий – появление более дешёвых чипов и снижение цены секвенирования – делает геномные методы всё более доступными. Особого внимания заслуживает применение метода genomic selection, который позволяет рассчитать племенную ценность животных на основе совокупности маркеров задолго до проявления фенотипических признаков. Для ахалтекинцев с их поздним созреванием (до 5–6 лет) это могло бы существенно ускорить прогресс в селекции по резвости и экстерьеру.

Нельзя обойти стороной и этический аспект: вмешательство в генетическую структуру древней породы должно быть крайне осторожным. Задача состоит не в том, чтобы искусственно «улучшить» породу, а в том, чтобы сохранить её природное разнообразие и адаптивный потенциал. Поэтому любые рекомендации по использованию маркер-опосредованной селекции должны сопровождаться тщательным анализом возможных потерь редких аллелей, которые могут оказаться ценными в изменяющихся условиях среды. В этом контексте популяционная генетика выступает не как инструмент форсированного отбора, а как средство мониторинга и поддержания генетического равновесия.

Заключение. Подводя итоги, следует констатировать, что современные методы популяционной генетики представляют собой незаменимый ресурс для сохранения и рационального использования генофонда ахалтекинской породы. Микросателлитный анализ уже сегодня обеспечивает надёжный контроль происхождения и первичную оценку генетической изменчивости, что подтверждают работы отечественных исследователей [2, 3]. В то же время переход к SNP-генотипированию и полногеномным подходам открывает принципиально новые горизонты: от детекции участков генома, находящихся под селективным давлением, до прогнозирования индивидуальных фенотипов и оптимизации подбора родительских пар. Имеющиеся данные по мастям [1], резвостным и экстерьерным признакам [3], а также анализу структуры производящего состава [4] создают базу для дальнейших углублённых исследований, однако требуют расширения выборок и стандартизации протоколов.

Наиболее насущными задачами являются: (1) создание общедоступной референтной панели аллелей для ахалтекинской породы; (2) проведение GWAS с привлечением фенотипических записей из племенных книг; (3) разработка экономически эффективных схем геномной селекции; (4) внедрение обязательной генетической паспортизации для всех племенных жеребцов и маток; (5) обучение специалистов конезаводов основам молекулярной генетики для интерпретации результатов тестов. Параллельно необходимо вести мониторинг эффективного размера популяции и следить за

тем, чтобы селекционные мероприятия не приводили к неоправданному снижению генетической вариабельности.

В долгосрочной перспективе интеграция популяционно-генетического подхода в традиционную зоотехнию позволит не только сохранить чистопородность ахалтекинской лошади, но и повысить её конкурентоспособность в мировом коневодстве, сохранив при этом уникальный исторический облик и адаптивные свойства. Важно помнить, что генетическое разнообразие – это основа устойчивости породы к будущим вызовам, будь то климатические изменения, новые инфекционные болезни или смена требований к спортивным качествам. Поэтому инвестиции в геномные исследования ахалтекинцев следует рассматривать как вклад в культурное и экономическое будущее нашей страны.

Таким образом, современные популяционно-генетические методы, будучи грамотно интегрированными в селекционную практику, позволяют перейти от интуитивного подбора пар к научно обоснованному управлению генофондом, что особенно важно для малочисленных пород с высоким риском инбридинга. Развитие этого направления должно стать одним из приоритетов отечественной науки и практики коневодства на ближайшие годы.

Список литературы

1. Абрамова, Н. В. Генетическая детерминация мастей лошадей чистокровной ахалтекинской породы / Н. В. Абрамова, С. И. Сорокин // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2015. – № 1-1. – С. 129-133.

2. Абрамова, Н. В. Генетическое разнообразие ахалтекинской породы лошадей по локусам микросателлитов ДНК / Н. В. Абрамова, А. В. Устьянцева, Т. Н. Рябова // Коневодство и конный спорт. – 2019. – № 2. – С. 7-9. – DOI 10.25727/HS.2019.2.28002.

3. Алексеева, Е. И. Анализ резвостных и экстерьерных показателей жеребцов-производителей ахалтекинской породы / Е. И. Алексеева, Н. В. Абрамова, Н. Е. Федорова // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 50. – С. 93-101.

4. Карелина, О. А. Характеристика производящего состава ахалтекинской породы лошадей / О. А. Карелина, С. С. Воронина // Приоритетные направления научно-технологического развития агропромышленного комплекса России : Материалы Национальной научно-практической конференции, Рязань, 22 ноября 2018 года. – Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2019. – С. 131-136.

УДК 004.89:551.524

Якубу Шараф-Дин
Научный руководитель: Монахов М. Ю., д.т.н., профессор
Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, Владимир, Россия

РАННИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ: ВЫСОКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ ВОЛН И ОЦЕНКЕ ИНТЕНСИВНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФИЗИЧЕСКИ-ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация. В этой статье представлены первые экспериментальные результаты по прогнозированию тепловых волн и оценке их интенсивности с использованием физически обоснованных нейронных сетей (PINN). Основная цель исследования - попытаться преодолеть ограничения традиционных моделей машинного обучения при работе с экстремальной жарой. В модель встроено уравнение теплопроводности, которое позволяет нам учитывать физические законы. Для обучения использовались климатические данные ERA5 с высоким разрешением за летний период 2024 года по Европе. Результаты показывают, что модель довольно точно определяет, где и с какой силой развивается волна жары. Особенно хорошо видно сильное повышение температуры в Центральной и Восточной Европе. В целом, работа демонстрирует перспективность использования PINNs для таких задач.

Ключевые слова: физически обоснованные нейронные сети, PINNs, тепловые волны, прогнозирование жары, экстремальные климатические явления, высокое разрешение, уравнение теплопроводности, ERA5, анализ интенсивности, Западная Европа.

Введение

Экстремальные климатические условия в Западной Европе в последние годы стали особенно острой проблемой. Лето 2019 года запомнилось одной из самых сильных аномальных жар в регионе, которая затронула Францию, Германию и страны Бенилюкса. 25 июля 2019 года в Париже была зафиксирована температура 42,6 °C, а во многих районах Германии столбик термометра превысил 40 °C (Votar et al., 2020). Причиной послужила устойчивая система высокого давления, усиленная антропогенным изменением климата. По оценкам Метеорологического управления Великобритании (2019), такое событие стало в десять раз более вероятным из-за влияния человека. Во Франции число дополнительных смертей превысило 1400 человек, а возросший спрос на кондиционирование создал серьёзную нагрузку на энергосистему [11].

Лето 2022 года стало самым жарким за всю историю наблюдений в Европе, причём Западная Европа пострадала особенно сильно (Ballester et

al., 2023). С 16 по 19 июля температура в Великобритании впервые превысила 40 °C, достигнув 40,3 °C в Конингсби. Во Франции и Испании были зафиксированы значения 42 °C и 43 °C соответственно (Copernicus, 2022). Длительная жара с июня по август была вызвана устойчивым атмосферным «тепловым куполом». Согласно данным Всемирной метеорологической организации (ВМО, 2023), по всей Европе от жары погибло более 60 000 человек, наибольшее число смертей пришлось на Францию и Испанию. Одновременно сильная засуха привела к интенсивным лесным пожарам в Португалии, где выгорело 96 000 гектаров леса (EFFIS, 2022) [11].

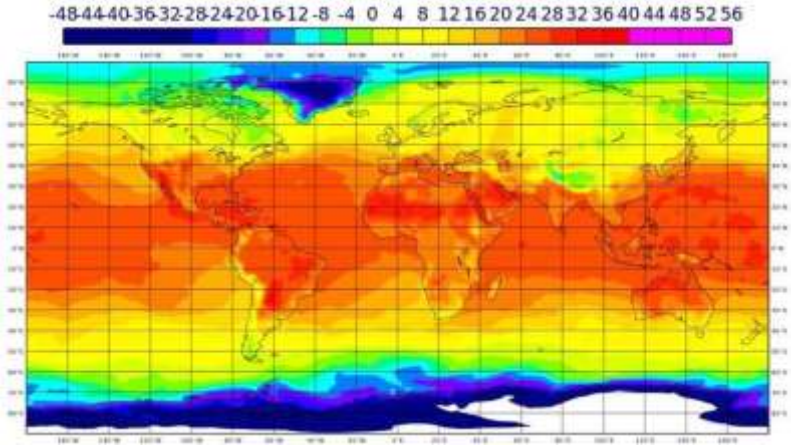


Рисунок 1 – Периоды сильной жары в мире в 2022 году [12]

Таблица 1 – Примеры экстремальных климатических явлений

Событие	**Регион**	**Дата**	**Последствия**	**Источник**
Тепловая волна 2019 года	Франция, Германия	Июль 2019	Более 1400 смертей (Франция)	Vautard et al., 2020
Тепловая волна 2022 года	Великобритания, Испания, Франция	Июль 2022	Более 60 000 смертей (Европа)	Ballester et al., 2023

В связи с этим растёт потребность в более точных методах прогнозирования тепловых волн. Традиционные подходы машинного обучения часто показывают серьёзные ограничения при работе с экстремальными событиями. Поэтому в данной работе используются физически-информированные нейронные сети (PINNs), которые имеют важные преимущества перед классическими методами. Методология включает сбор и предварительную обработку данных (раздел 2.1), а также разработку модели для прогнозирования и анализа интенсивности тепловых волн (раздел 3). В статье представлены экспериментальные результаты и

анализ высокоточного прогнозирования экстремальных климатических явлений [3].

1. Преимущества PINN перед традиционным ML

В отличие от стандартных моделей машинного обучения, которые учитывают ограничения посредством регуляризации, PINN напрямую интегрируют физические уравнения в процесс обучения. Это обеспечивает соответствие фундаментальным законам физики и делает прогнозы более физически последовательными и надежными. Это делает PINNS особенно эффективной для моделирования редких и экстремальных климатических явлений, где традиционные ML-модели часто теряют точность [6].

Нейронные сети, основанные на физике (PINN), представляют собой гибридную парадигму моделирования, которая объединяет глубокое обучение с фундаментальными физическими законами. Предложенные Раисси, Пердикарисом и Карниадакисом [1, 2], PINNS встраивают управляющие дифференциальные уравнения в частных производных (PDE) непосредственно в процесс обучения, позволяя нейронным сетям учиться на основе данных, удовлетворяя при этом физическим ограничениям [3, 8].

Ключевое отличие от традиционных нейронных сетей заключается в использовании составной функции потерь:

$L = \lambda d L\text{data} + \lambda p L\text{physics},$

гдеLdata характеризуетстепеньрасхожденияснаблюдаемымиданными,а Lphysics оцениваетневязкууправляющихуравнений.

Весовыекоэффициентыλdи λpобеспечивают баланс между точностью согласования с данными и соблюдением физических закономерностей [1].

2. Уравнение теплопроводности для моделирования тепловых волн и засух

Для описания температурной динамики, связанной с тепловыми волнами и засухами в Западной Европе, используется уравнение теплопроводности – одно из основных уравнений математической физики.

В одномерном случае оно записывается следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

где $T\ (x,\ t)$– температура, зависящая от пространства и времени, а α– коэффициент температуропроводности.

Для двумерного моделирования поверхности суши и атмосферы уравнение принимает вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)$$

Такая форма позволяет учитывать температурные аномалии, включая эффект городских «островов тепла» и последствия засух [2, 9].

В более общем виде модель включает дополнительный член Q, описывающий источники и потоки тепла:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + Q$$

В архитектуре PINN уравнение теплопроводности включается в функцию потерь как физическое ограничение. Для этого минимизируется невязка:

$$R(x,t) = \frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \nabla^2 T - Q$$

где T– температура, предсказанная моделью. Это позволяет PINN не только соответствовать данным, но и сохранять физическую корректность моделирования.

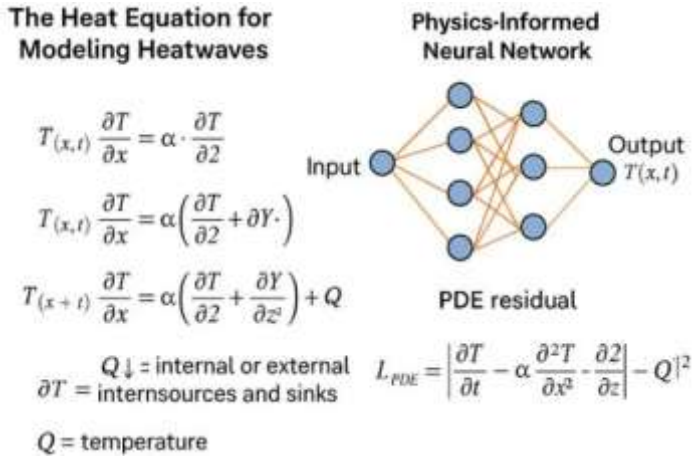


Рисунок 2 – Настройка моделирования PDE для тепловых волн [13]

3. Обзор связанных работ

Прогнозирование тепловых волн традиционно опиралось на численные климатические модели и статистические методы. Однако при экстремальной жаре их точность часто падает, особенно на фоне изменения климата. В последние годы активно используются методы машинного обучения, в частности LSTM и CNN. Так, Jacques-Dumas et al. (2022) успешно применили сверточные сети для прогнозирования длительных тепловых волн [4, 7].

Особый интерес вызывают физически-информированные нейронные сети (PINNs), предложенные Raissi et al. (2019). Они объединяют реальные данные с физическими законами, что даёт более устойчивые и согласованные прогнозы. Например, в работе Qi He et al. (2026) модель HW-

OPINN хорошо себя показала при прогнозировании морских тепловых волн [1, 5, 8].

Тем не менее, применение PINNs для высокоточного прогнозирования именно наземных тепловых волн и анализа их интенсивности пока остаётся малоизученным. Настоящая работа представляет предварительные экспериментальные результаты в этом направлении.

4. Методология

4.1Сбор и предварительная обработка данных

Для точного прогнозирования экстремальных погодных условий в Западной Европе (1980–2025 гг.) требуются климатические данные с высоким разрешением, включающие пространственные и временные модели. Повторный анализ ERA 5, скорректированный с точностью до 10 км вместо 31 км, позволяет получить данные об атмосферных и поверхностных переменных. Спутниковые данные Meteosat (3–5 км, 15 минут) и MODIS (1 км) позволяют анализировать краткосрочные события и поверхностную энергию. Блоки E-OBS (0,1°) облегчают коррекцию смещения, в то время как наборы CORTEX (0,11°) учитывают неопределенность. Предварительная обработка включает интерполяцию, выравнивание по времени, стандартизацию и контроль качества с помощью фильтрации и кригинга. Этот унифицированный набор данных поддерживает нейронные сети, основанные на физике, для моделирования наводнений, аномальной жары и засухи [10, 12, 11].

4.2 Проблема уменьшения масштаба

Методы масштабирования позволяют уточнить результаты грубых климатических моделей (50–250 км), полученных с помощью CWM и ESM, до данных высокого разрешения (менее 10 км, каждые сутки) для прогнозирования экстремальных климатических явлений в Западной Европе, таких как периоды сильной жары и осадки. Гибридный подход объединяет нейронные сети, основанные на физике, со статистическим уменьшением масштаба, сочетая физическую точность и возможности моделирования глубокого обучения [12,13].

4.3 Оптимизация рабочего процесса в Jupyter

Для оптимизации времени выполнения в среде Jupyter были применены следующие методы.

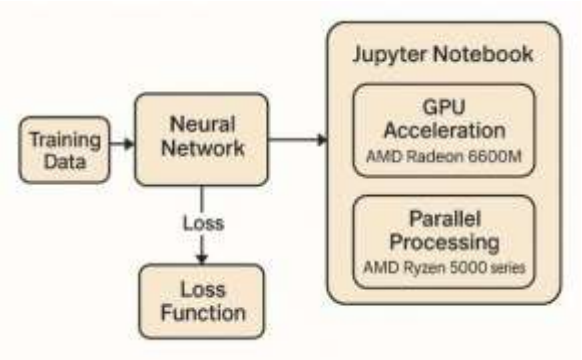


Рисунок 3 – Высокопроизводительная вычислительная платформа для обучения PINN [6].

Эта диаграмма (рис. 3) описывает интеграцию обучающих данных, нейронной сети и функции потерь в среде Jupyter notebook. Ускорение рабочего процесса обеспечивается графическим процессором AMD Radeon 6600M, а возможности параллельной обработки - процессором AMD Ryzen серии 5000. В совокупности эти компоненты повышают скорость и эффективность процесса обучения.

4.4 Прогнозированиеэкстремальных климатическихявленийсвысоким разрешением

В этом исследовании использовался набор климатических данных в формате NetCDF, обработанный с использованием библиотеки Python xarray. Первоначально данные были представлены в формате GRIB и преобразованы в NetCDF в соответствии со стандартом CF-

1.7 для обеспечения совместимости с системами климатического и метеорологического анализа. Набор данных охватывает летний период с 1 июня по 31 августа 2024 года и содержит 2208 часовых временных шагов. Пространственная сетка включает в себя 101 точку по широте (от 40° северной широты до 65° северной широты) и 121 точку по долготе (от 10° восточной широты до 40° восточной долготы) [7].

4.5 Прогнозирование и анализ интенсивности тепловой волны

Платформа сочетает в себе методы глубокого обучения и физически обоснованные нейронные сети (PINN) для моделирования и прогнозирования интенсивности тепловых волн на основе данных о температуре из файлов NetCDF и физических ограничениях теплопередачи. На рис. 4 показана динамика обучения, демонстрирующая эффективную конвергенцию для нейронной сети, основанной на физике (PINN). Общее количество данных и потери данных неуклонно снижаются, что отражает повышение точности прогнозирования. Физические потери относительно стабильны, что гарантирует согласованное применение ограничения пространственного сглаживания, основанного на лапласианах. От периода 1 (общая потеря: 0,1594) до периода 200 (общая потеря: 0,0064) общая ошибка

заметно уменьшается. Небольшое увеличение физических потерь в дальнейшем указывает на баланс между точностью данных и физической регуляризацией, что характерно для оптимизации PINN. Результаты показывают эффективное сочетание обучения на основе данных и физической согласованности [11, 13].

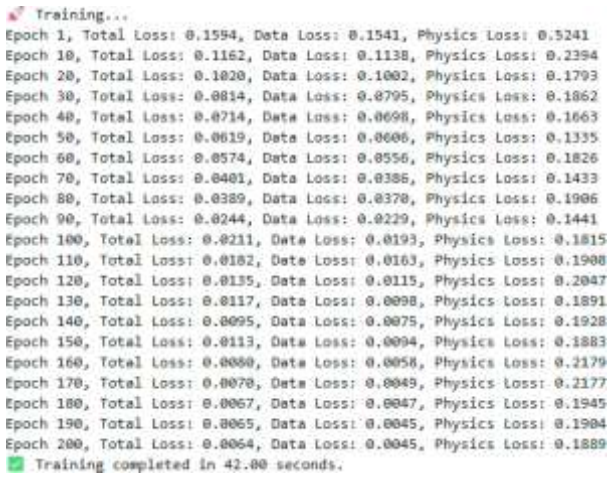


Рисунок 4 – Процесс обучения

Четкое совпадение кривых общих потерь и потери данных указывает на доминирование обучения, основанного на данных, - физический термин, действующий как согласованный регуляризатор. Полученные результаты подчеркивают интерес к интеграции физических ограничений в глубокое обучение для пространственно-временного моделирования тепловых волн, как показано на рисунке 4 [13].

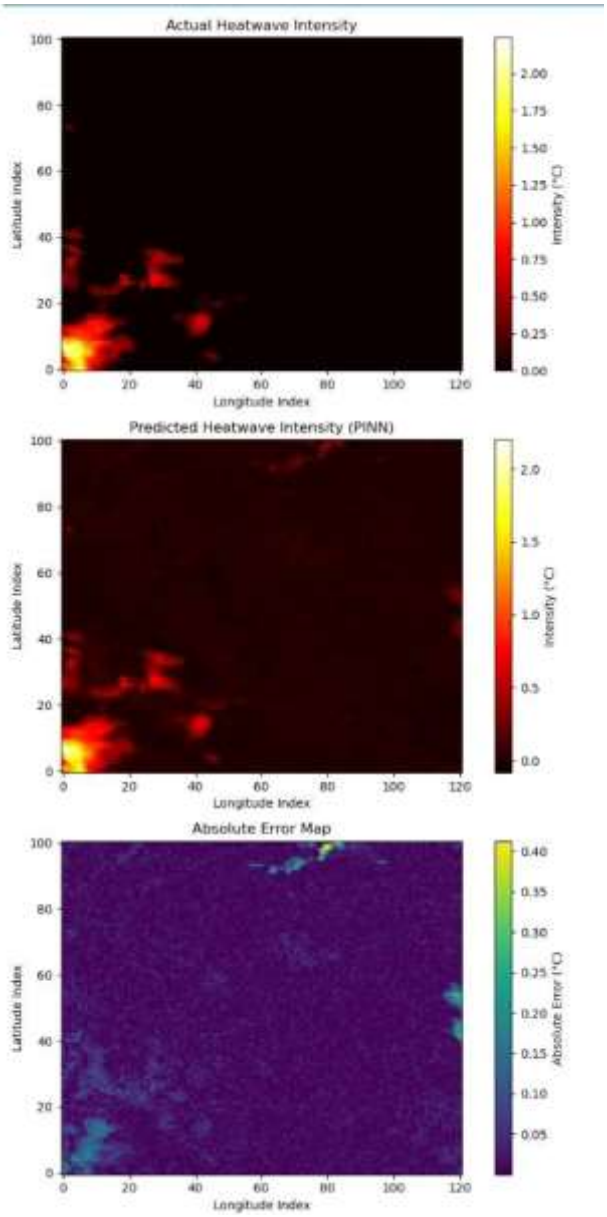


Рисунок 5 – Визуальное сравнение фактических и прогнозируемых полей интенсивности тепловых волн

На рисунке 5 сравниваются фактические и прогнозируемые поля интенсивности тепловой волны с помощью анализа абсолютной погрешности. На рисунке (вверху) показаны горячие точки, расположенные в нижнем левом квадранте. Прогнозы PINN (посередине) точно воспроизводят пространственное распределение и величину областей высокой интенсивности. Абсолютные погрешности (внизу) остаются низкими, в основном в периферийных областях или областях с низкой интенсивностью.

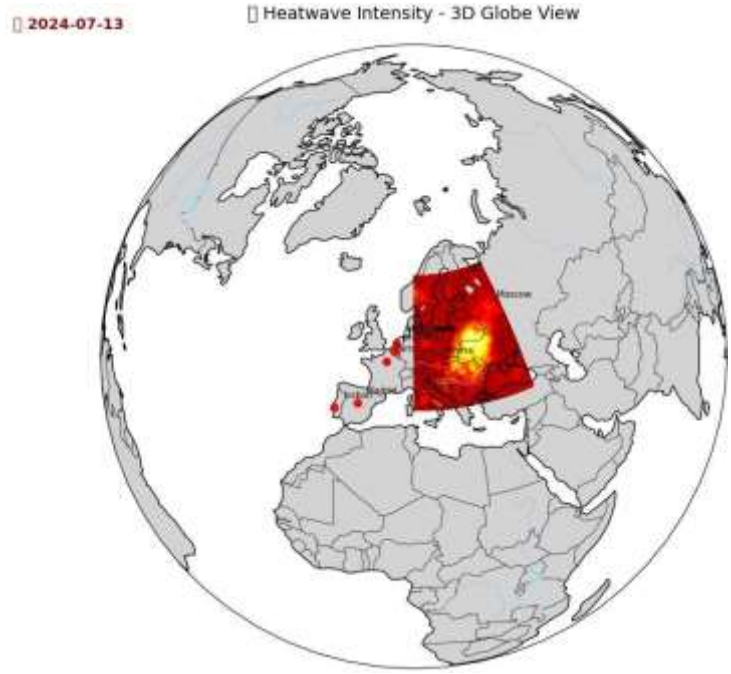


Рисунок 6 – Трехмерный обзор прогноза тепловых волн на земном шаре

Рисунок 6 показывает распределение интенсивности тепловой волны в Европе 13 июля 2024 года на 3D-глобусе. Самая сильная жара наблюдалась в Центральной и Восточной Европе

– там преобладают ярко-жёлтые и оранжевые области. Красные зоны охватывают значительную часть континента. В целом модель хорошо справилась с определением как местоположения, так и интенсивности тепловой волны.

5. Направлений будущих исследований

Будущие исследования будут направлены на расширение структуры PINN за счет включения дополнительных физических процессов, адаптивных методов обучения и обработки данных в режиме реального времени для повышения точности и оперативности климатических прогнозов. В частности, модель будет расширена для моделирования других связанных с климатом катастроф, таких как засухи, наводнения, лесные пожары и сильные штормы. Другим важным направлением исследования является разработка систем 3D-визуализации в режиме реального времени, позволяющих осуществлять непрерывный мониторинг и интерактивное представление экстремальных климатических явлений и динамики их пространственной интенсивности.

Список литературы:

1. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. E. Physics–informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. – 2019. – Vol. 378. – P. 686–707. DOI: 10.1016/j.jcp.2018.10.045

2. Clark R., Brown S. Influences of Circulation and Climate Change on European Summer Heat Extremes // Journal of Climate. – 2013. – No. 26(23). P. 9621–9632.

3. Beck T.M., Schumacher D.L., Achebak H. [et al]. Mortality burden attributed to anthropogenic warming during Europe's 2022 record-breaking summer // npj Clim Atmos Sci. – 2024. – No.7. – Art. 245.

4. Jacques-Dumas V., [et al.]. Deep learning for the detection and prediction of heatwaves using climate model data // Environmental Research Letters. – 2022. – Vol. 17. – No. 8. – P. 084032. DOI: 10.1088/1748-9326/ac849a EDN: HCZGVP

5. Karniadakis G. E., [et al.]. Physics–informed machine learning // Nature Reviews Physics. – 2021. – Vol. 3. – No.6. – P. 422–440. DOI: 10.1038/s42254-021-00314-5 EDN: OTNHOM

6. Hersbach H., Bell B., [et al]. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2020. – Vol. 146. – No. 730. – P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803 EDN: DKXYTO

7. Кислов А.В., Алексеева Л.И., Варенцов М.И., Константинов П.И. Изменение климата и экстремальные погодные явления в Московской агломерации // Метеорология и гидрология. – 2020. – Т. 45. – № 7. – С. 498–507. DOI: 10.3103/S1068373920070055 EDN: LDDUJB

8. Shevchenko O., Snizhko S., Zapototskyi S., Matzarakis A. Biometeorological Conditions during the August 2015 Mega-Heat Wave and the Summer 2010 Mega-Heat Wave in Ukraine // Atmosphere. – 2022. – Vol. 13, No. 1. – P. 99. DOI: 10.3390/atmos13010099

9. Руденко Ю. и др. Физически-информированные нейросети как инструмент восстановления параметров турбулентного течения // Heat Transfer Research, 2025.

10. Тарасов В. Д., Тархов Д. А., Шатров А. В. Технология физически информированных нейронных сетей на примере задачи математического моделирования процесса биологической очистки стоков // Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века. – Пермь: ПГНИУ, 2025. – С. 74–78. EDN: IBBSTY

11. European Heatwave 2022: Climate Summary Report [Электронный ресурс] // Copernicus Climate Change Service. – 2022. – URL: https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2022 (дата обращения: 25.05.2026).

12. World Meteorological Organization. State of the Global Climate 2022. – Geneva: WMO, 2023.

13. Якубу Шараф-Дин. Physics-Informed Neural Networks for Climate Extremes Prediction in Western Europe // Основанные на физике нейронные сети для прогнозирования экстремальных климатических явлений в Западной Европе: магистерская диссертация. – Москва: МИСИС, 2025.

Приложение А – Общая вставка библиотеки

```
import xarray as xr
import   matplotlib.pyplot   as
plt import cartopy.crs as ccrs
import    cartopy.feature    as
cfeature import numpy as np
import  os
import
netCDF4
import  matplotlib
import torch
import torch.nn as nn
from sklearn.metrics import mean_absolute_error, mean_squared_error, r2_score
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
import   matplotlib.pyplot   as
plt   import   torch.optim   as
optim
from    torch.utils.data    import    TensorDataset,
DataLoader from tqdm import tqdm
from torch.cuda.amp import autocast, GradScaler
import matplotlib.animation as animation
from     matplotlib     import
gridspec  from  IPython.display
import HTML
from sklearn.model_selection import TimeSeriesSplit
```

УДК 532.546:622.276

Егоров Д. М.
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ НЕСМЕШИВАЮЩЕГОСЯ ДВУХФАЗНОГО ВЫТЕСНЕНИЯ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Аннотация. В статье представлено численное моделирование и анализ устойчивости процесса несмешивающегося двухфазного вытеснения нефти водой в двумерной пористой среде. Исследуется совместное влияние отношения вязкостей фаз, капиллярных и гравитационных сил на формирование зоны перемешивания и развитие вязкостной неустойчивости («вязких пальцев»). С помощью гидродинамического симулятора показано, что гравитационные эффекты способны кардинально изменять форму фронта вытеснения, а капиллярная диффузия может стабилизировать течение. Проведена оценка коэффициента извлечения нефти для различных режимов фильтрации. Полученные результаты позволяют оптимизировать процессы заводнения при разработке нефтяных месторождений.

Ключевые слова: двухфазная фильтрация, неустойчивость фронта вытеснения, вязкие пальцы, капиллярные силы, гравитационное вытеснение, пористая среда.

Введение

Добыча нефти из нефтеносных пластов является одной из ключевых задач современной энергетики. Одним из наиболее распространенных методов повышения нефтеотдачи является заводнение – процесс закачки воды в пласт для вытеснения нефти к добывающим скважинам [1]. При этом нефть и вода представляют собой несмешивающиеся фазы, что делает процесс их вытеснения сложным с физической и гидродинамической точек зрения. Эффективность такого процесса во многом определяется устойчивостью фронта вытеснения, на которую влияют множество факторов: отношение вязкостей фаз, капиллярные силы, неоднородность пористой среды, а также гравитационные силы, способные существенно изменять характер течения в пласте.

В условиях неблагоприятного отношения вязкостей (когда вязкость закачиваемой воды меньше вязкости нефти) и плотностей фаз возникает явление неустойчивости, приводящее к образованию “пальцев” воды и снижению нефтедобычи [2]. Кроме того, капиллярные эффекты могут стабилизировать фронт вытеснения в зависимости от условий процесса, что особенно важно при моделировании реальных пластов.

Актуальность исследования

Изучение устойчивости несмешивающегося двухфазного вытеснения в пористой среде остается актуальной задачей как с теоретической, так и с

практической точек зрения. В условиях истощения легкодоступных месторождений возрастает интерес к разработке месторождений с высокой вязкостью нефти, где неустойчивость фронта вытеснения проявляется особенно сильно. Понимание механизмов, влияющих на устойчивость, позволяет оптимизировать процесс заводнения, повысить коэффициент извлечения нефти и снизить затраты на разработку.

В настоящей работе, помимо классических факторов – капиллярных сил и отношения вязкостей фаз – также учитывается влияние гравитационных сил, что приближает модель к реальным условиям эксплуатации пластов [3]. Численное моделирование позволяет исследовать совместное воздействие этих факторов на формирование зоны перемешивания и развитие неустойчивостей.

Постановка задачи. Начальные и граничные условия.

Рассмотрим двумерный пористый пласт (считаем, что ширина пласта $L_y = 1$ м) длины $L = 200$ м, высоты $H = 50$ м (рис. 1). Пористость пласта $\phi\ [-]$ считаем постоянной и равной 0,2. Верхняя и нижняя границы пласта непроницаемы. Весь процесс будем считать изотермическим ($T = const$, $[T] =$ К).

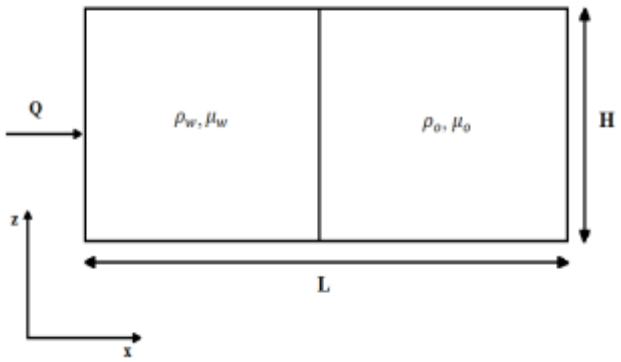


Рисунок 1 – Двумерная модель пласта

В начальный момент времени в пласте находится только нефть – несмачивающая жидкость, динамическая вязкость и плотность которой равны μ_o [П] и $\rho_o\ [\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}]$ соответственно. Давление в пласте в начальный момент равно $P_o^0 = P^0 - \rho_o g z$, где $P^0 = 200$ бар. Давление фазы воды в начальный момент времени не определено.

Пласт находится в поле силы тяжести ($g = 9{,}8\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$).

С объемным расходом $Q = 5 \cdot 10^{-5}\ \frac{\text{м}^3}{c}$ через левую границу пласта ($x=0$) закачивается смачивающая жидкость – вода – с параметрами

μ_w [П] и ρ_w $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right]$. Также считаем, что на левой границе пласта находится только фаза воды, скорость которой равна $u_{wx}(0,z) = \frac{Q}{H \cdot L_y}$. На правой границе $(x = L)$ параметры системы равны начальным, а именно $P_w(L,\, z) = P^0 - \rho_w g z$. Такое условие достигается за счет того, что на правой границе пласт сообщается с некоторым полым объемом, в который под действием давления стекает жидкость. Считаем, что на правой границе пласта находится исключительно фаза нефти.

Основные уравнения

Уравнения, определяющие динамику несмешивающегося двухфазного вытеснения, задаются балансом массы для двухфазного течения и законом Дарси (уравнения 1, 2) [4]:

$$\frac{\partial(\phi S_i)}{\partial t} + \nabla \cdot u_i = 0, i = o, w \tag{1}$$

$$\boldsymbol{u_i} = -\frac{k k_{ri}(S_i)}{\mu_i}(\nabla P_i - \rho_i \boldsymbol{g}), i = o, w \tag{2}$$

$$S_w + S_o = 1, \tag{3}$$

$$P_c(S_w) = P_o - P_w = P_{cap} \cdot J(S_w), \tag{4}$$

Граничные условия задаются следующим набором уравнений:

$$\begin{cases} u_{wx}(0,z) = \dfrac{Q}{H \cdot L_y}, \\ S_w(0,z) = 1\,, \\ P_o(L,\, z) = P^0 - \rho_o g z, \\ S_o(L,z) = 1, \end{cases}$$

где индексы o и w обозначают фазы нефти и воды соответственно, ϕ – пористость породы, S_i – насыщенность фазы i, $\boldsymbol{u_i}$ – скорость фильтрации (Дарси) фазы i, $\boldsymbol{g}$ – вектор ускорения свободного падения, k – абсолютная проницаемость горной породы, k_{ri} – фазовая проницаемость для фазы i, μ_i – динамическая вязкость фазы i, P_i – давление в фазе i, P_c – капиллярное давление, P_{cap} – характерное капиллярное давление, $J(S_w)$ – J-функция Леверетта. В качестве дополнительных соотношений представлены соотношение на насыщенности и формула капиллярного давления (3-4).

Так как в уравнениях в чистом виде не присутствует давление P_i, а только производные давлений фаз нефти и воды, а также разность давлений

фаз в соотношении на капиллярное давление, то мы имеем полную свободу в выборе аддитивной константы для давления:

$$P_i = P_i' - \rho_o g z, i = o, w. \quad (5)$$

Здесь $\boldsymbol{g} = g\boldsymbol{e_z}$, где $\boldsymbol{e_z}$ – единичный вектор, направленный вдоль оси z. Путем подстановки приведенной выше замены (5), где мы вычитаем гидростатическое давление фазы нефти из давления обеих фаз, в уравнение (2), и опустив индекс $'$, закон Дарси принимает вид:

$$\begin{cases} \boldsymbol{u_w} = -\dfrac{k k_{rw}(S_w)}{\mu_w}(\nabla P_w - \Delta\rho \boldsymbol{g}) \\ \boldsymbol{u_o} = -\dfrac{k k_{ro}(S_o)}{\mu_o}\nabla P_o \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $\Delta\rho = \rho_w - \rho_o$ – разность плотностей фаз. Таким образом получаем систему уравнений, состоящую из уравнений (1, 3, 4, 6):

$$\begin{cases} \dfrac{\partial(\phi S_i)}{\partial t} + \nabla \cdot u_i = 0, i = o, w, \\ \boldsymbol{u_w} = -\dfrac{k k_{rw}(S_w)}{\mu_w}(\nabla P_w - \Delta\rho \boldsymbol{g}), \\ \boldsymbol{u_o} = -\dfrac{k k_{ro}(S_o)}{\mu_o}\nabla P_o, \\ S_w + S_o = 1, \\ P_c(S_w) = P_o - P_w. \end{cases}$$

Обезразмеривание системы уравнений

Для обезразмеривания уравнений (1, 3, 4, 6) сначала перейдем к безразмерным величинам:

$$t^* = \frac{t}{T}, \quad (7)$$

$$x^* = \frac{x}{L}, \quad (8)$$

$$z^* = \frac{z}{H}, \quad (9)$$

$$Q' = \frac{Q}{H}, \tag{10}$$

$$\boldsymbol{u_i^*} = \frac{\boldsymbol{u_i}}{Q'}, \tag{11}$$

$$P_i^* = \frac{P_i}{P_Q}, \tag{12}$$

$$\rho_i^* = \frac{\rho_i}{\Delta\rho}. \tag{13}$$

Здесь: T – характерное время, L – характерная длина, равная длине пласта, Q' - соотнесенный объемный расход – объемный расход, поделенный на поперечное сечение пласта. Индекс * используется для обозначения безразмерных величин. Подставим соотношения (7-11) в уравнение (1):

$$\frac{\phi}{T}\frac{\partial S_i}{\partial t^*} + \frac{Q'}{L}\frac{\partial u_{ix}^*}{\partial x^*} + \frac{Q'}{H}\frac{\partial u_{iz}^*}{\partial z^*} = 0$$

Поделив уравнение выше на $\frac{Q'}{L}$, получаем:

$$\left(\frac{\phi L}{TQ'}\right)\frac{\partial S_i}{\partial t^*} + \frac{\partial u_{ix}^*}{\partial x^*} + \frac{L}{H}\frac{\partial u_{iy}^*}{\partial z^*} = 0$$

Свобода в выборе характерного времени T предоставляет нам возможность задать $\left(\frac{\phi L}{TQ'}\right) = 1$. Поэтому, опуская индекс *, получаем безразмерный закон сохранения массы для двухфазного течения.

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} + \frac{\partial u_{ix}}{\partial x} + \delta\frac{\partial u_{iz}}{\partial z} = 0, \tag{14}$$

где $\delta = \frac{L}{H}$ – критерий подобия, характеризующий соотношение размеров пласта.

Далее обезразмерим закон Дарси, подставив соотношения (7-13) в систему уравнений (6).

$$\begin{cases} Q'\boldsymbol{u_w^*} = -\dfrac{kk_{rw}(S_w)}{\mu_w}\left(\dfrac{P_Q}{L}\dfrac{\partial P_w^*}{\partial x^*}\boldsymbol{e_x} + \dfrac{P_Q}{H}\dfrac{\partial P_w^*}{\partial z^*}\boldsymbol{e_z} + \Delta\rho g\boldsymbol{e_z}\right) \\ Q'\boldsymbol{u_o^*} = -\dfrac{kk_{ro}(S_o)}{\mu_o}\left(\dfrac{P_Q}{L}\dfrac{\partial P_o^*}{\partial x^*}\boldsymbol{e_x} + \dfrac{P_Q}{H}\dfrac{\partial P_o^*}{\partial z^*}\boldsymbol{e_z}\right) \end{cases}$$

Поделим уравнения выше на Q':

$$\begin{cases} \boldsymbol{u_w^*} = -\dfrac{kk_{rw}(S_w)}{Q'\mu_w}\left(\dfrac{P_Q}{L}\dfrac{\partial P_w^*}{\partial x^*}\boldsymbol{e_x} + \dfrac{P_Q}{H}\dfrac{\partial P_w^*}{\partial z^*}\boldsymbol{e_z} + \Delta\rho g\boldsymbol{e_z}\right) \\ \boldsymbol{u_o^*} = -\dfrac{kk_{ro}(S_o)}{Q'\mu_o}\left(\dfrac{P_Q}{L}\dfrac{\partial P_o^*}{\partial x^*}\boldsymbol{e_x} + \dfrac{P_Q}{H}\dfrac{\partial P_o^*}{\partial z^*}\boldsymbol{e_z}\right) \end{cases}$$

Для дальнейшего преобразования воспользуемся законом Дарси для однофазного течения и получим, что:

$$Q' = \frac{k}{\mu_o}\frac{P_Q}{L} \tag{15}$$

Здесь P_Q – характерное давление, равное разнице между давлением на левой границе пласта и давлением на правой границе пласта $P_Q = P_{inj} - P_0$. Именно из-за такого выбора характерного давления в уравнении (15) производная давления преобразуется в $\nabla P_w = \frac{P_Q}{L}$.

Таким образом, опуская индекс *, получаем безразмерный закон Дарси для фазы нефти (несмачивающей жидкости):

$$\boldsymbol{u_o} = -k_{ro}(S_o)\left(\frac{\partial P_o}{\partial x}\boldsymbol{e_x} + \delta\frac{\partial P_o}{\partial z}\boldsymbol{e_z}\right) \tag{16}$$

Введем критерий подобия M – отношение динамических вязкостей двух фаз – характеризует влияние вязких сил на задачу:

$$M = \frac{\mu_o}{\mu_w} \tag{17}$$

Тогда, проведя аналогичное преобразование, получаем закон Дарси для фазы воды (смачивающей жидкости):

$$\boldsymbol{u_w} = -Mk_{rw}(S_w)\left(\frac{\partial P_w}{\partial x}\boldsymbol{e_x} + \delta(\frac{\partial P_w}{\partial z} + \frac{1}{Gr})\boldsymbol{e_z}\right) \tag{18}$$

Здесь $Gr = \frac{P_Q}{\Delta\rho g H}$ – гравитационное число – еще один критерий подобия задачи, характеризующий влияние силы тяжести на течение в пористой среде.

Перейдем к безразмерному уравнению капиллярного давления. Для этого подставим соотношение (12) в уравнение (4):

$$(P_o^* - P_w^*) \cdot P_Q = P_{cap} \cdot J(S_w)$$

В правой части полученного уравнения: P_{cap} – характерное капиллярное давление, $J(S_w)$ – J-функция Леверетта.

Пользуясь тем же соображением (15), что и при обезразмеривании закона Дарси, имеем:

$$Ca = \frac{P_Q}{P_{cap}} = \frac{Q'\mu_w L}{P_{cap}k} \tag{19}$$

Здесь Ca – капиллярное число – критерий подобия, характеризующий действие капиллярных сил в задаче. Таким образом, опуская индекс * для безразмерных величин, получаем безразмерное соотношение на капиллярное давление:

$$P_o - P_w = \frac{1}{Ca} \cdot J(S_w) \tag{20}$$

Подводя итог данного раздела, получаем систему уравнений в безразмерном виде (21) из уравнений (3, 14, 16, 18, 20):

$$\begin{cases} \dfrac{\partial S_i}{\partial t} + \dfrac{\partial u_{ix}}{\partial x} + \delta \dfrac{\partial u_{iz}}{\partial z} = 0, \\ \boldsymbol{u_o} = -k_{ro}(S_o)\left(\dfrac{\partial P_o}{\partial x}\boldsymbol{e_x} + \delta \dfrac{\partial P_o}{\partial z}\boldsymbol{e_z}\right), \\ \boldsymbol{u_w} = -Mk_{rw}(S_w)\left(\dfrac{\partial P_w}{\partial x}\boldsymbol{e_x} + \delta(\dfrac{\partial P_w}{\partial z} + \dfrac{1}{Gr})\boldsymbol{e_z}\right), \\ P_c = \dfrac{1}{Ca}\cdot J(S_w) = P_o - P_w, \\ S_w + S_o = 1. \end{cases} \quad (21)$$

Решение системы уравнений (21) зависит исключительно от критериев подобия *Ca*, *Gr*, δ и *M*. Аналогичным образом, путем подстановки безразмерных величин в граничные условия, получаем граничные условия в безразмерном виде:

$$\begin{cases} P_o(1,z) = P^0, \\ P_w(1,z) = P^0 - \dfrac{1}{Gr}z, \\ S_o(1,\ z) = 1, \\ u_{wx}(o,z) = 1, \\ u_{ox}(o,z) = 0, \\ S_{w(0,\,z)} = 1. \end{cases} \quad (22)$$

Анализ результатов численного моделирования

Систему уравнений (21) решить аналитически невозможно, поэтому далее будем решать её с помощью численного моделирования. Все расчёты, представленные в текущем разделе, были проведены в симуляторе течения жидкости и газа в пористой среде MUFITS [5] с помощью метода конечных объемов. Влияние неустойчивости на характер течения будем оценивать, рассчитывая коэффициент извлечения нефти по формуле $R = \frac{\int_V \phi S_w dV}{\int_V \phi dV}$, а также рассчитывая длину зоны перемешивания в верхней половине пласта и в нижней половине пласта для каждого решения по формуле $X = x_{max} - -x_{min}$, где x_l – длина зоны перемешивания, x_{max} – координата правой границы зоны перемешивания – максимальная абсцисса, при которой $S_w >$

> 0, x_{min} – координата левой границы зоны перемешивания – минимальная абсцисса, при которой $S_w \leq 0$. На рис. 2 можем увидеть пример зоны перемешивания, образующейся при вытеснении нефти фазой воды.

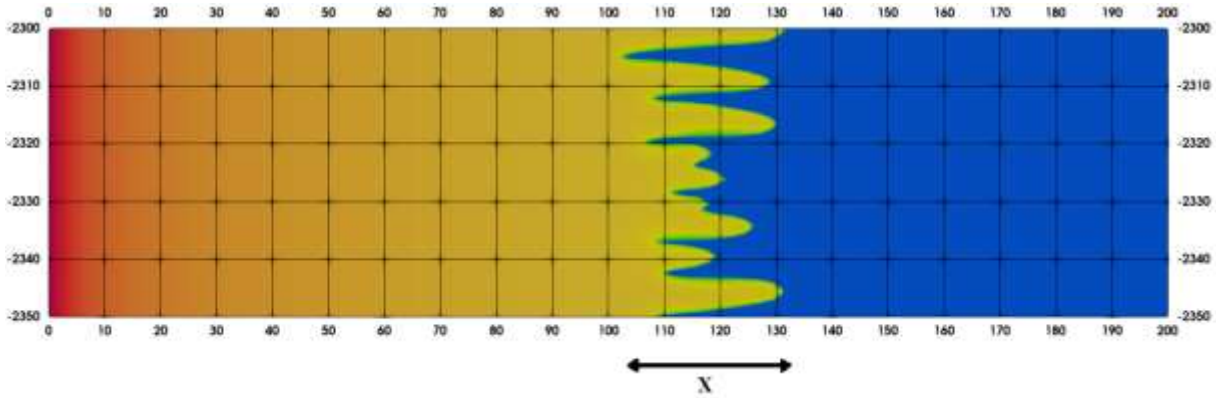


Рисунок 2 – Пример зоны перемешивания

Перед тем, как приступить к рассмотрению результатов моделирования для более глубокого понимания процессов, обосновывающих формирование различных длин зоны перемешивания при варьировании *Gr, Ca* и *M*, следует проанализировать физические процессы, стоящие за образованием получаемых “пальцев”.

В случаях с высокими M и *Ca* (рис. 7(б)) “пальцы” выглядят более длинными и тонкими, так называемые вязкие “пальцы” отчетливо выражено прорывание воды к правой границе пласта. Такое поведение системы характерно для режима, где вязкие силы доминируют над капиллярными: небольшое возмущение – отклонение от базового решения – быстро растет с течением времени, и капиллярная диффузия не успевает сгладить боковые стенки образовывающихся “пальцев”.

При большом M, но низком *Ca* (рис. 7(а)) картина иная – “пальцы” становятся более широкими, размытыми по вертикали. Такой механизм обусловлен тем, что капиллярные силы под действием перепада давления на границе фаз направляют закачиваемую жидкость в соседние поры, расширяя участок, заполненный смачивающей жидкостью, и замедляя продвижение смачивающей жидкости вдоль пласта [6]. При очень малых значениях числа *Ca* неустойчивость, вызываемая большой разностью динамических вязкостей фаз, может быть полностью подавлена, и фронт вытеснения остается плоским.

Гравитационное число Gr задает “клинообразность” фронта вытеснения: при малых числах Gr наблюдаем, как закачиваемая жидкость под действием силы тяжести стремится к нижней части пласта, что и приводит к клинообразному виду фронта вытеснения.

Предельный случай

Для начала рассмотрим предельный случай, в котором силы гравитации отсутствуют $(Gr \to +\infty)$, с целью понять механизм образования неустойчивости в зависимости от тех или иных значений M и Ca, после чего оценим влияние гравитационного числа Gr на полученные нами выводы.

1. Влияние выбора сетки, наложенной на двумерный пласт.

Выберем сетки со следующим разбиением ячеек: 200×100, 200×200, 400×200, 400×400.

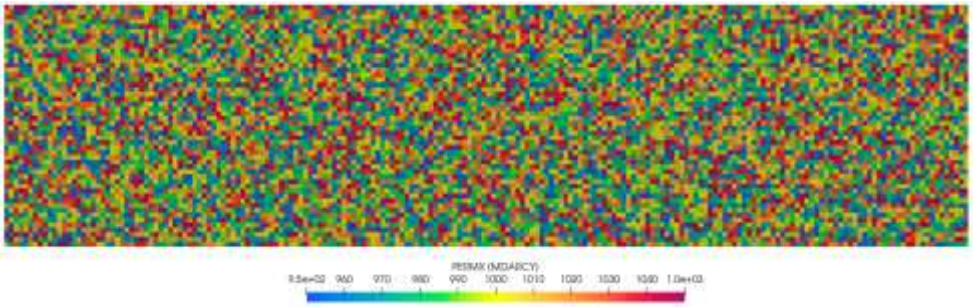


Рисунок 3 – Распределение проницаемости по оси x для модели 400x200 ячеек

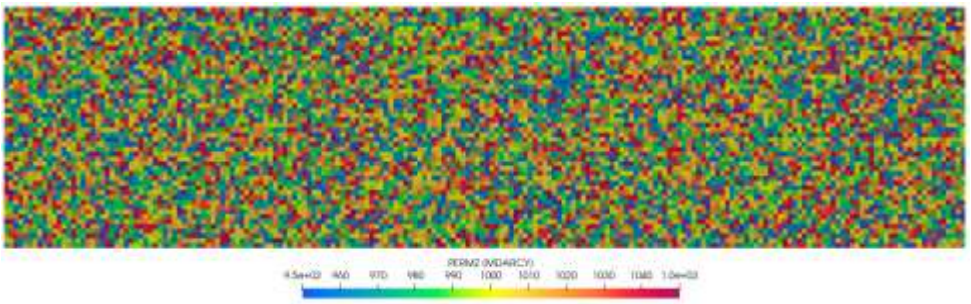


Рисунок 4 – Распределение проницаемости по оси z для модели 400x200 ячеек

На рисунках 3, 4 представлено распределение проницаемости относительно осей X и Z соответственно для сетки 400×200 ячеек. Колебания абсолютной проницаемости были заданы псевдослучайным образом (фиксируем одинаковую инициализацию генерации случайных чисел для всех расчетов) на промежутке [950 мД, 1050 мД], чтобы отразить природные неоднородности в горной породе. Во всех расчетах, представленных в текущем параграфе заданы капиллярное число $Ca = 100$ и отношение вязкостей $M = 100$.

Из рисунка 5, на котором изображена зависимость безразмерной длины зоны перемешивания от безразмерного времени, можем сделать вывод, что подробность разбиения сетки привносит небольшие изменения, минимально влияющие на скорость роста неустойчивости.

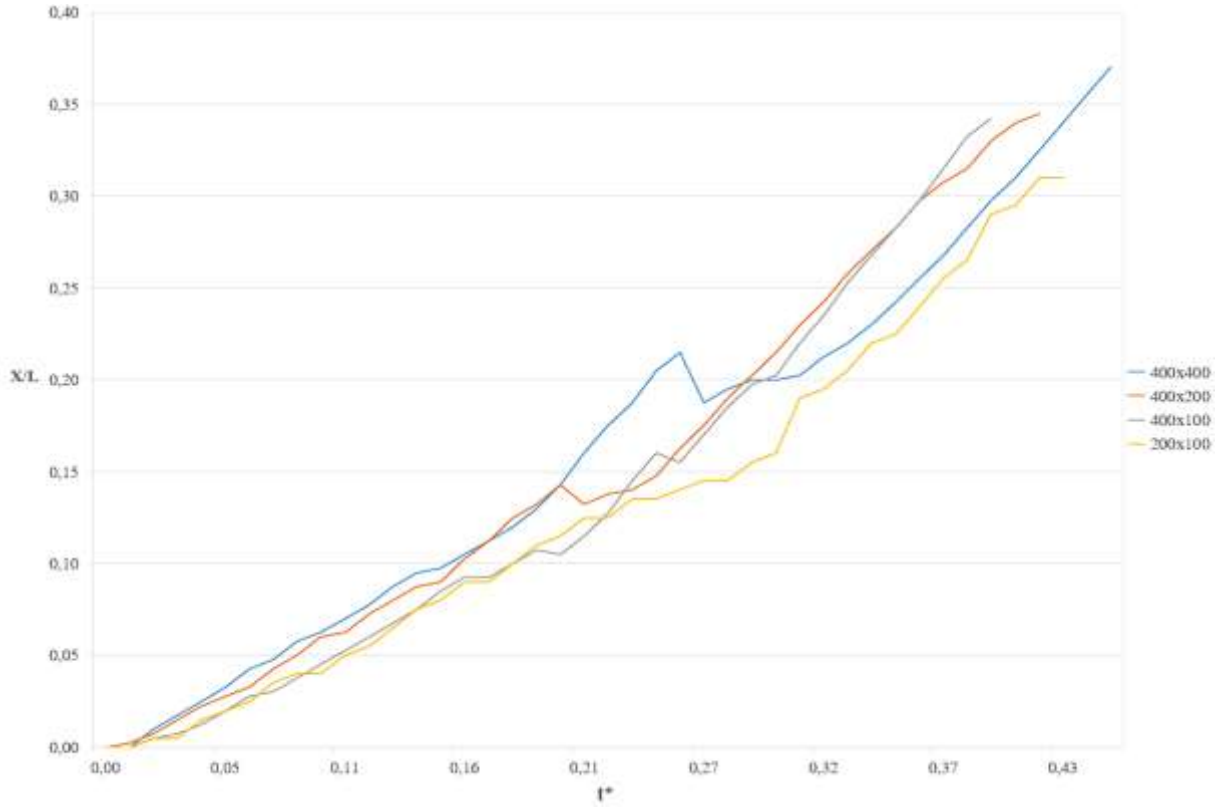


Рис. 5. Протяженность зоны перемешивания от безразмерного времени при варьировании разбиения расчетной области

Вывод о незначительном влиянии выбора сетки справедлив для выбранной нами характеристики неустойчивости – длины зоны перемешивания. Однако для корректного моделирования формы пальцев и локальных градиентов насыщенности требования к сетке выше. Сетка 200x100 может быть недостаточной для моделирования тонких “пальцев”, которые наблюдаются при высоких *Ca*, так как средняя толщина “пальца” может составлять небольшое количество ячеек. Сгущение сетки до 400x400 позволяет учесть более мелкие возмущения, что, как мы видим из графика, приводит к более раннему началу развития неустойчивости и более извилистой форме пальцев, что более приближено к двухфазному течению в реальных пластах.

Выбор сетки 400x200 для проведения дальнейших расчетов является разумным компромиссом между точностью моделирования и вычислительными затратами.

2. Влияние абсолютной проницаемости на устойчивость течения.

Зададим капиллярное число Ca=60 и отношение вязкостей M = 100 и будем варьировать значение проницаемости, заданное, как в предыдущем пункте, случайным образом. Из графика (рис. 6) видно, что на средний темп развития неустойчивости и образования “пальцев” неоднородность в

распределении проницаемости влияния не оказывает. Однако чем больше по модулю колебания в проницаемости ячеек, тем раньше начинает развиваться неустойчивость и образовываться зона перемешивания.

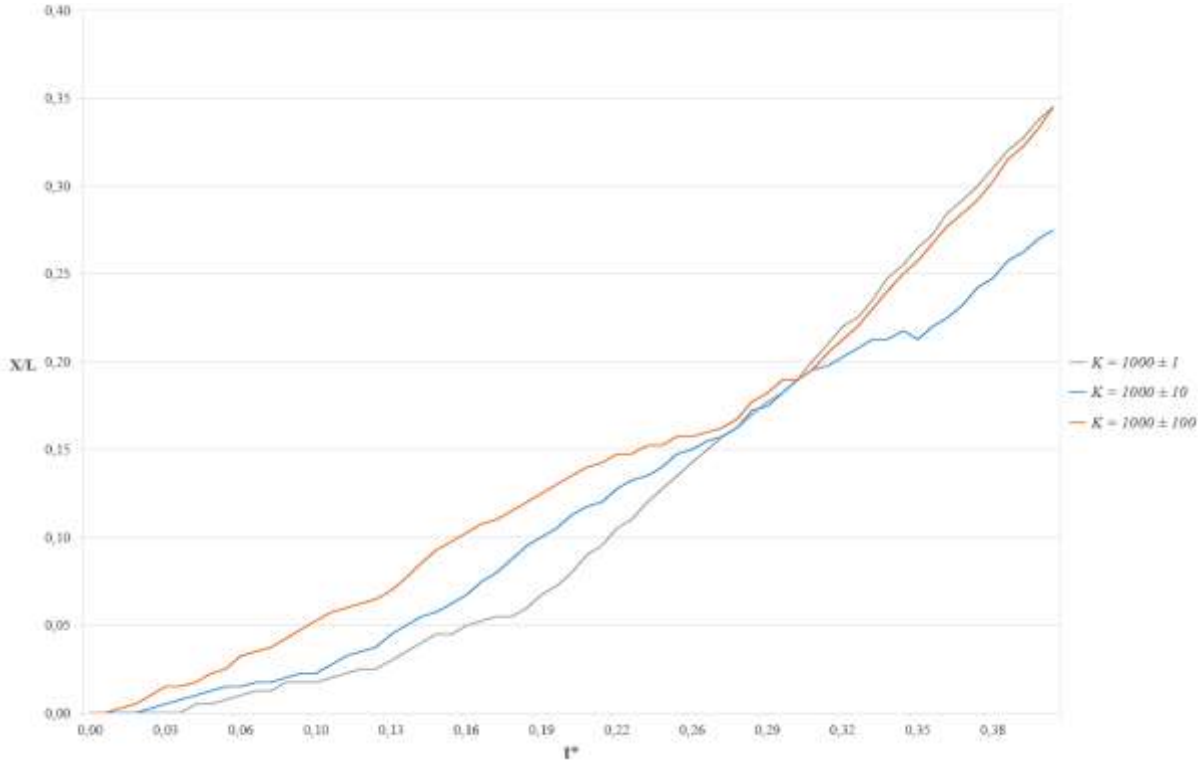


Рисунок 6 – Протяженность зоны перемешивания от безразмерного времени при варьировании разбиения расчетной области

Такие результаты демонстрируют ключевую роль неоднородности пористого пространства как инициатора развития возмущений. В абсолютно однородном пласте даже при высоких показателях M и Ca неустойчивость развивалась бы бесконечно долго из-за отсутствия начального возмущения. В реальности же всегда существуют неоднородности.

Равномерные неоднородности (рассматриваемые в нашей модели) приводят к развитию “пальцев” в местах случайного скопления ячеек с чуть большей проницаемостью. Разность в проницаемости ячеек определяет время развития “пальцев”: чем больше разброс, тем раньше локальные перепады давления разовьют возмущение. Однако, как только “пальцы” сформировались, их дальнейший рост контролируется уже механизмами вязкостной неустойчивости и капиллярными силами, что и объясняет схождение графиков на рисунке 6 к среднему темпу роста возмущений с течением времени.

3. Влияние капиллярного числа Ca на устойчивость течения.

Были проведены расчеты при одинаковом значении отношения вязкостей M = 50. Всего было проведено 3 расчета: в первом капиллярное число Ca = = *1*, во втором – Ca = *10*, в третьем – Ca = *100*. Как видно из рисунка 7, на котором представлен процесс вытеснения нефти водой в двумерном пласте для Ca = 1 (рис. 7(а)), Ca = 10 (рис. 7(б)) и Ca = 100 (рис. 7(в)) возмущения в течении и величина “пальцев” прямо зависит от капиллярного числа Ca – чем больше Ca, тем больше неустойчивость – при увеличении капиллярного числа фронт вытеснения размывается меньше по оси z, что приводит к образованию “пальцев”.

Предположение подтверждается графиком (рис. 8), на котором показана зависимость безразмерной длины зоны перемешивания от безразмерного времени. При Ca = 100 значение безразмерной длины зоны перемешивания к моменту прорыва достигает *0,17*, при Ca = 10 достигает 0,08, при Ca = 1 наблюдаем устойчивое течение с плоским фронтом вытеснения. Также заметим, чем больше Ca, тем раньше начинает развиваться неустойчивость.

4. Влияние вязких сил на устойчивость течения.

Зафиксируем значение капиллярного числа: Ca = 60. Будем варьировать значение отношения вязкостей *M*. Проведено 5 расчетов: при M = 10, при M = 25, при M = 50, при M = 75 и при M = 100. Из рисунка 9, на котором представлен процесс вытеснения нефти водой в двумерном пласте для M = = 10 (рис. 9(а)), M = 25 (рис. 9(б)), M = 50 (рис. 9(в)), M = 75 (рис. 9(г)) и M = 100 (рис. 9(д)) видно, что интенсивность развития возмущений и величина зоны перемешивания также напрямую зависят от M – чем больше M, тем больше неустойчивость.

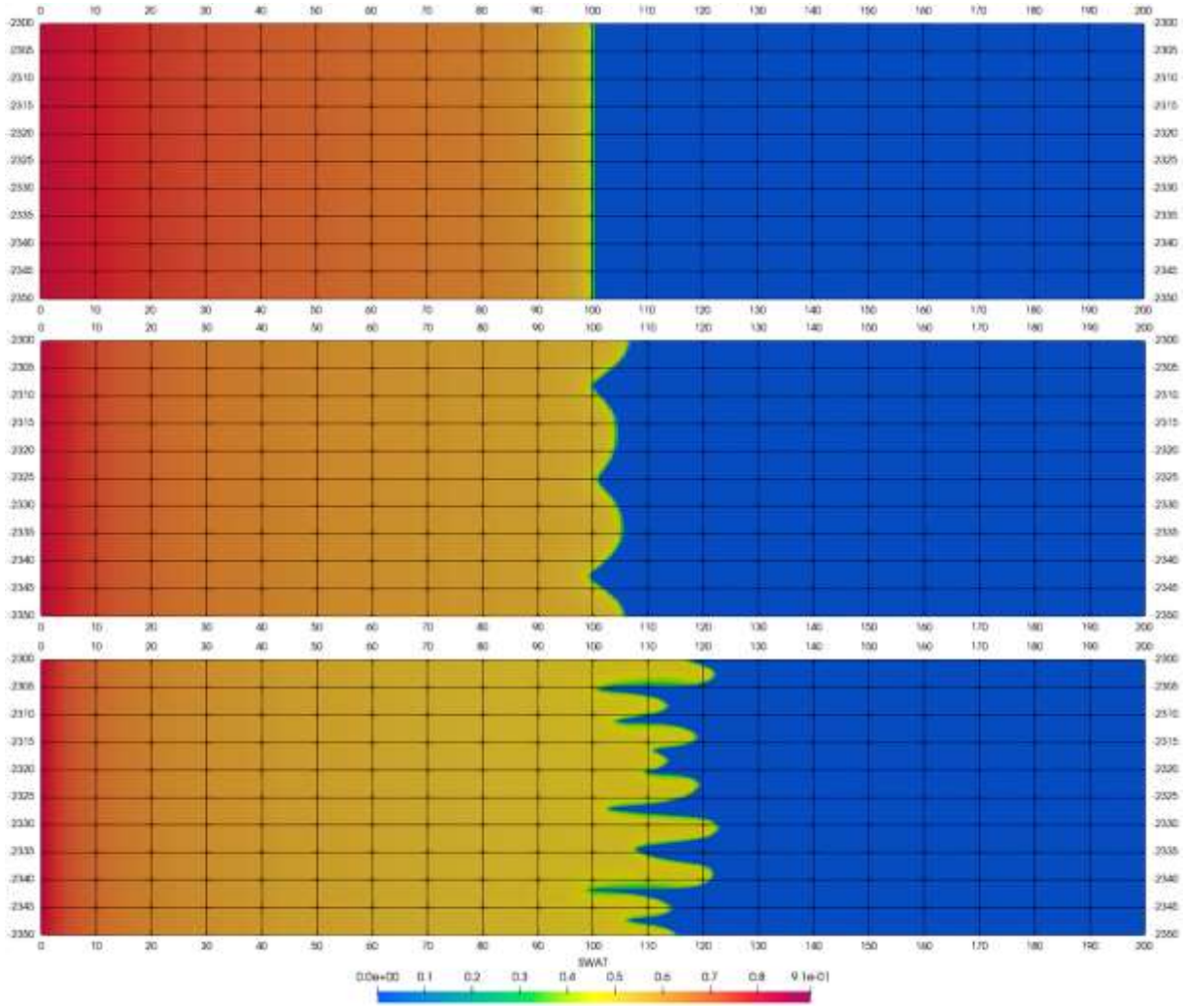


Рисунок 7 – Формирование неустойчивости при различных значениях капиллярного числа Ca в предельном случае: а) Ca=1, б) Ca = 10, в) Ca = 100

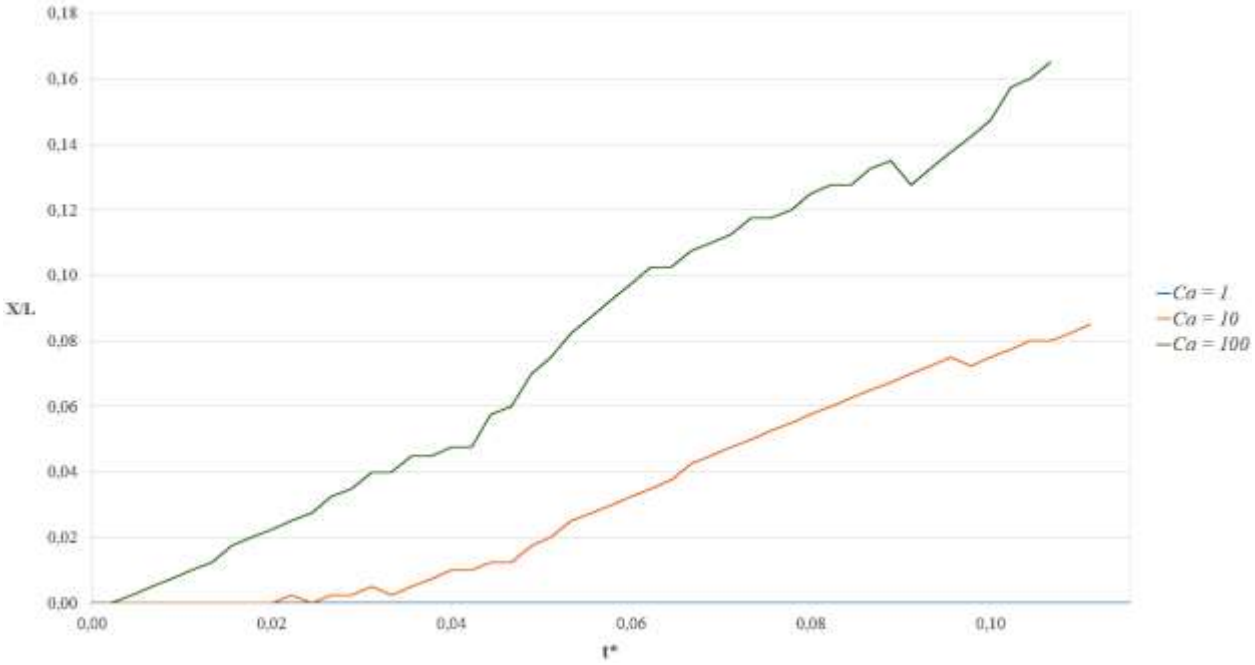


Рисунок 8 – Протяженность зоны перемешивания от безразмерного времени при варьировании капиллярного числа Ca

Предположение подтверждается графиком (рис. 10), на котором показана зависимость безразмерной длины зоны перемешивания от безразмерного времени. При M = 100 значение безразмерной длины зоны перемешивания в момент прорыва достигает *0,29*, при M = 75 достигает *0,22*, при M = 50 достигает *0,17*, при M = 25 достигает *0,05*, при M = 10 возмущений в течении не возникает. Также заметим, что чем больше M, тем раньше начинает развиваться неустойчивость.

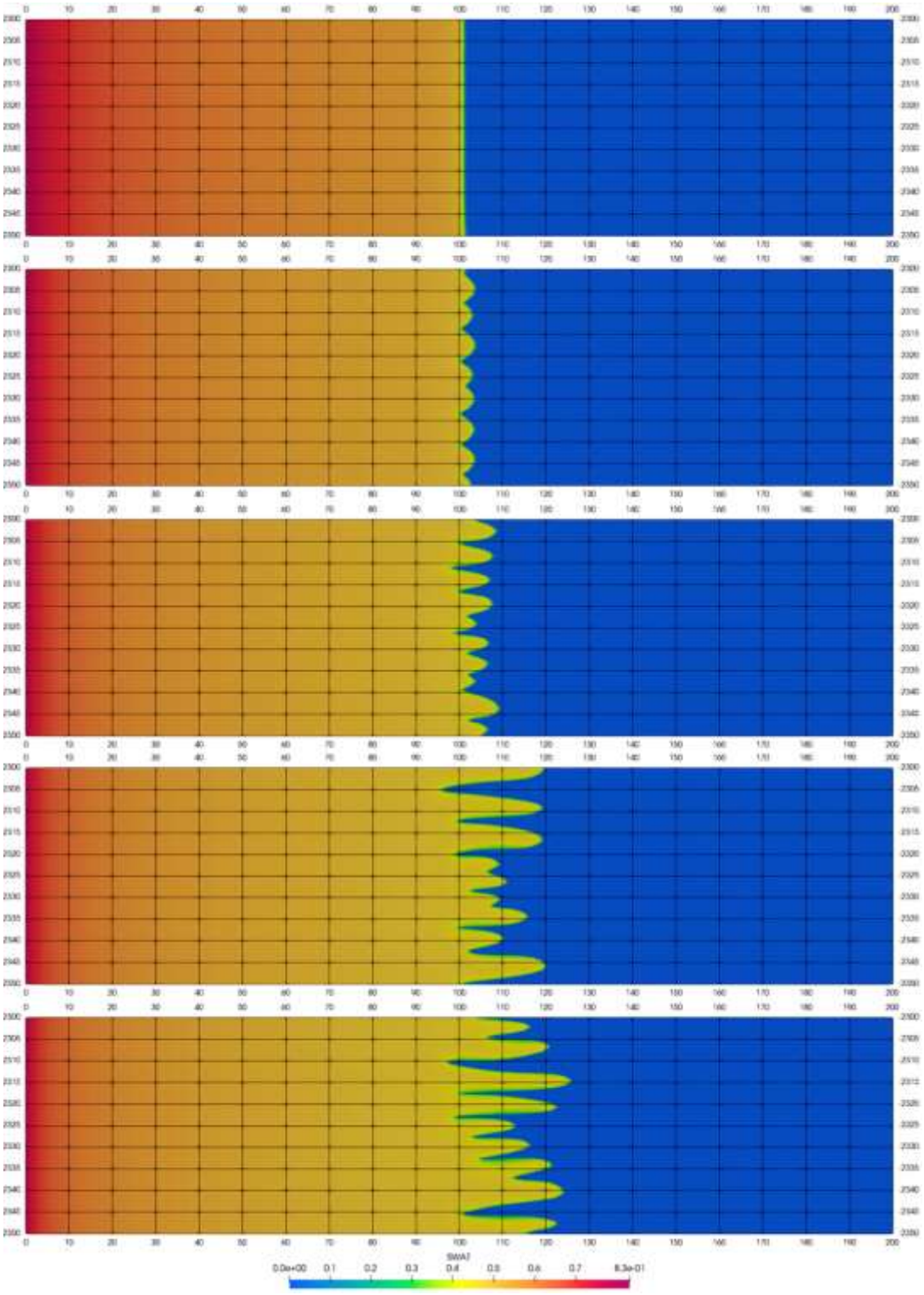


Рисунок 9 – Формирование неустойчивости при различных значениях соотношения вязкостей M в предельном случае: а) M = 10, б) M = 25, в) M = 50, г) M=75, д) M = 100

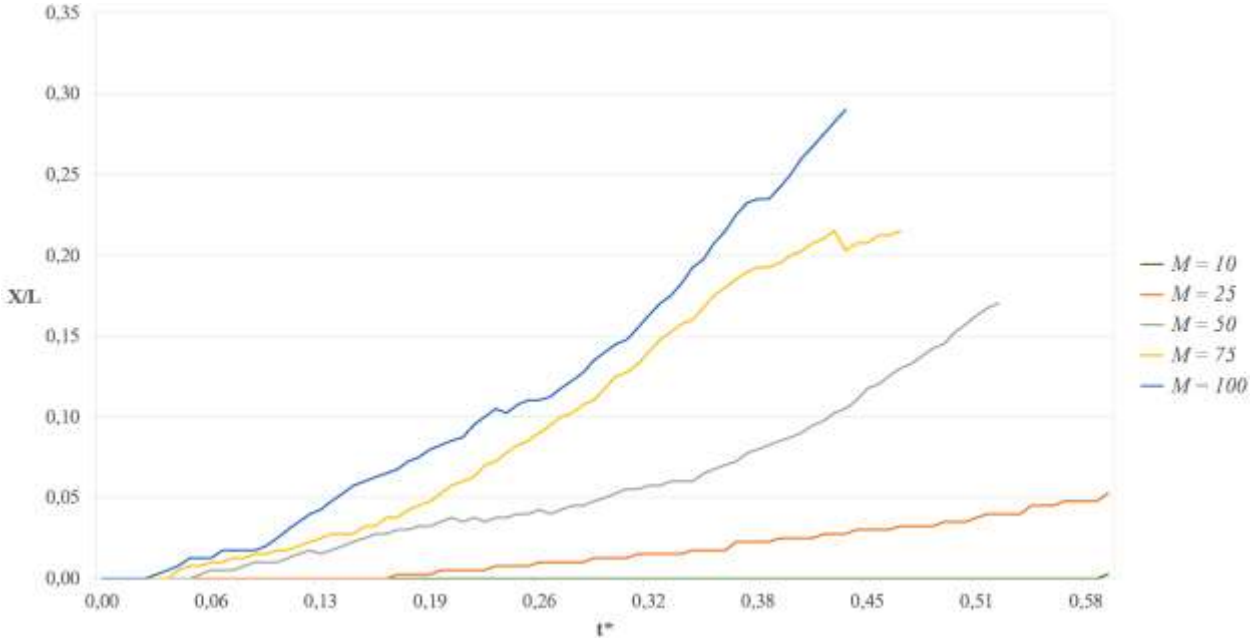


Рисунок 10 – Протяженность зоны перемешивания от безразмерного времени при варьировании соотношения динамических вязкостей M

Общий случай

1. Влияние силы гравитации на устойчивость течения.

Были проведены расчеты при одинаковом значении капиллярного числа *Ca* = 10 и отношения вязкостей фаз *M* = 50. Всего было проведено 3 расчета: при гравитационном числе *Gr* = 1, при *Gr = 10* и при *Gr = 100*. Как видно из рисунка 11, на котором представлен процесс вытеснения нефти водой в двумерном пласте при *Gr* = 1 (рис. 11(а)), при *Gr* = 10 (рис. 11(б)) и при *Gr* = 100 (рис. 11(в)) – для разных значений гравитационного числа мы наблюдаем различные режимы течения. Чем меньше *Gr*, тем больше закачиваемой, более плотной жидкости стремится в нижнюю часть пласта, что приводит к клинообразному виду фронта вытеснения.

На рис. 12 показана зависимость безразмерной длины зоны перемешивания в верхней половине пласта и нижней половине пласта от безразмерного времени – количества закачанных поровых объемов модели. Экстремумы графиков соответствуют моментам прорыва в проведенных расчетах – когда закачиваемая жидкость достигает правой границы пласта. При *Gr = 1* значение безразмерной длины зоны перемешивания в **нижней** половине пласта к моменту прорыва достигает *0,87*, при *Gr = 10* достигает *0,41*, при *Gr = 100* достигает *0,16*. При *Gr = 1* значение безразмерной длины зоны перемешивания в **верхней** половине пласта к моменту прорыва достигает *0,11*, при *Gr = 10* достигает *0,49*, при *Gr = 100* достигает *0,19*. Различное соотношение длин зоны перемешивания в верхней и нижней половине пласта при разных гравитационных числах *Gr* объясняется тем, что

более плотная жидкость под действием силы тяжести стремится продвинуться к правой границе пласта по нижней границе.

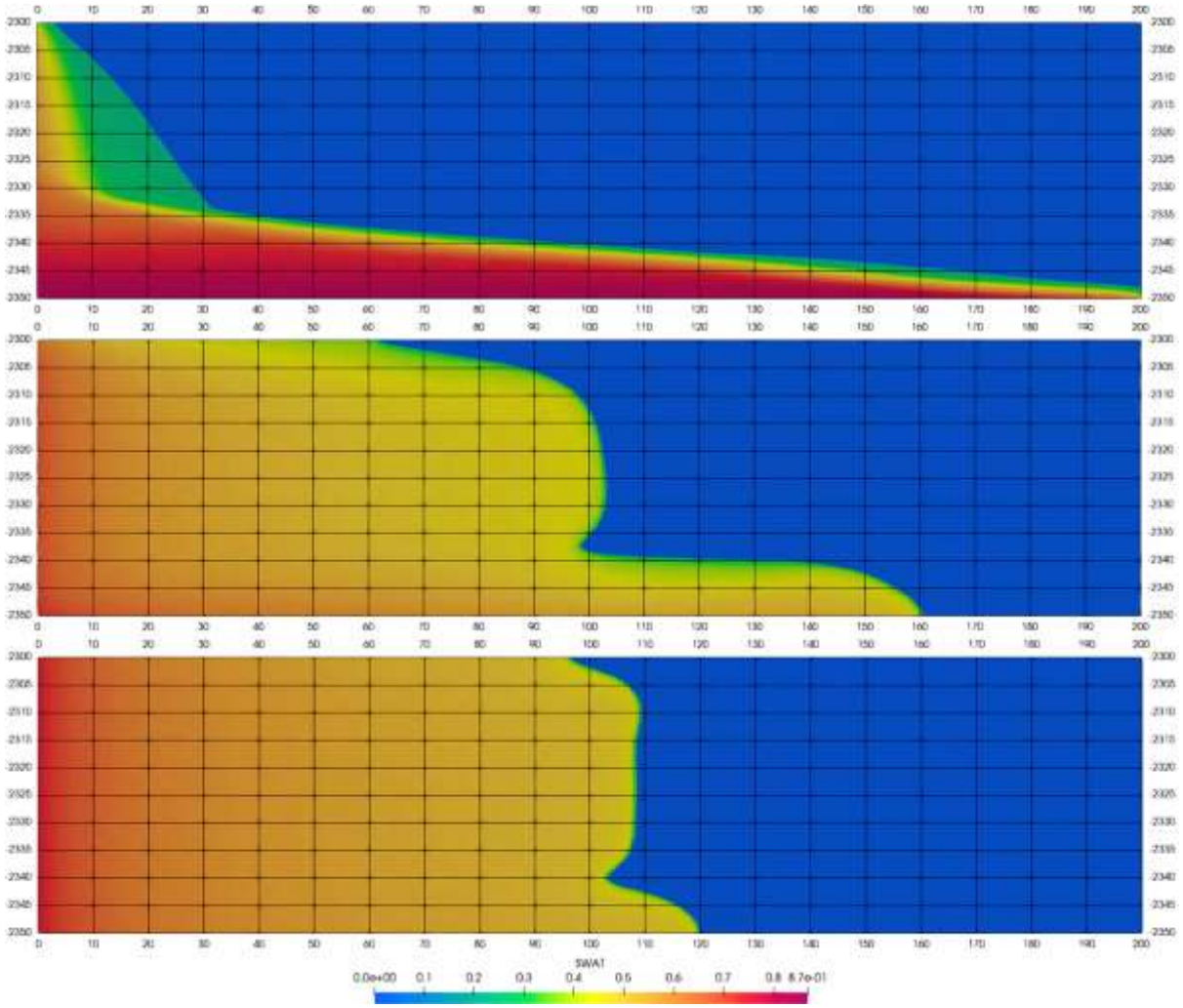


Рисунок 11 – Формирование неустойчивости при различных значениях гравитационного числа Gr: а) Gr=1, б) Gr = 10, в) Gr = 100

Однако из этого графика крайне тяжело сделать выводы о том, какое значение Gr благоприятно влияет на добычу нефти, содержащейся в пласте. Для этих целей мы рассчитаем КИН (коэффициент извлечения нефти) по формуле:

$$R = \frac{\int_V \phi S_w dV}{\int_V \phi dV}$$

Рассмотрим зависимость значений R от безразмерного времени (рис. 13). При Gr = 100 КИН к моменту прорыва достигает *0,54*, при Gr = 10 достигает

0,37, при *Gr = 1* достигает *0,17*. Как видно, нефтедобыча наиболее эффективна при больших числах *Gr*.

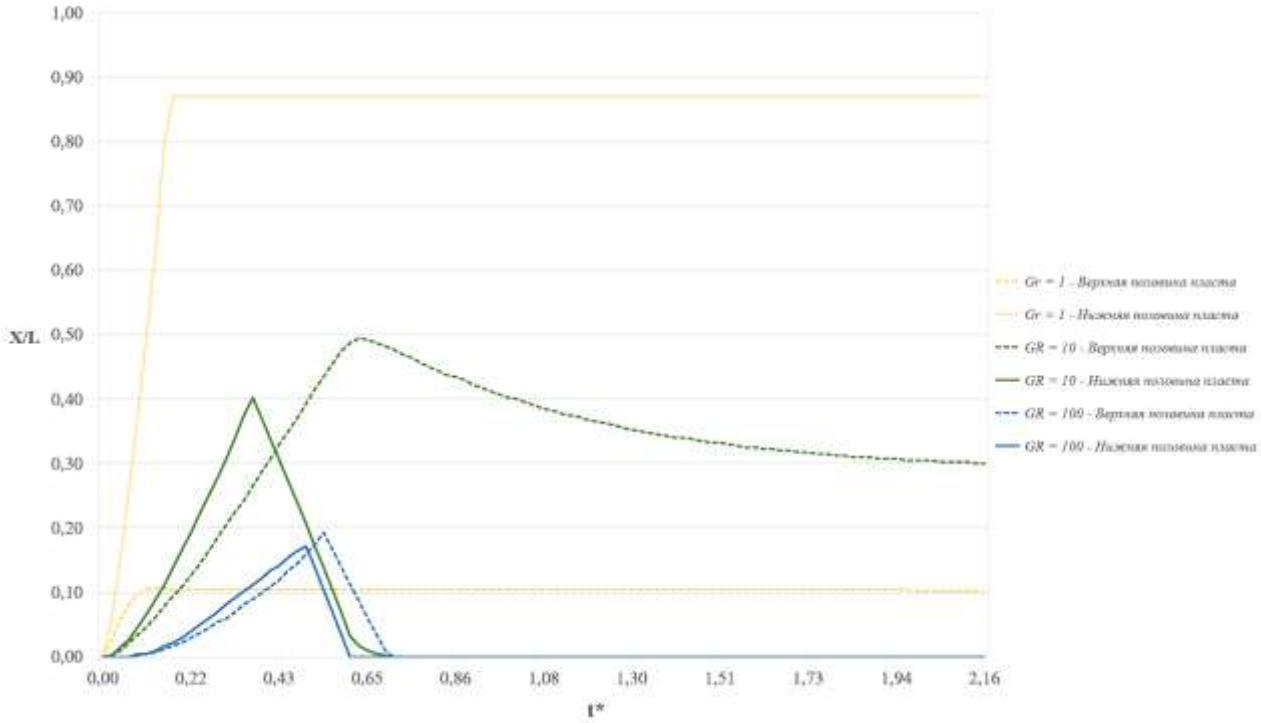


Рисунок 12 – Протяженность зоны перемешивания от безразмерного времени при варьировании гравитационного числа Gr

2. Влияние капиллярного числа Ca на устойчивость течения.

Были проведены расчеты при одинаковом значении гравитационного числа Gr = 10 и отношения вязкостей M = 50. Было проведено 3 расчета: капиллярное число *Ca = 1*, *Ca = = 10*, *Ca = 100*. Как видно из рисунка 14, на котором представлен процесс вытеснения нефти водой в двумерном пласте при Ca = 1 (рис. 14(а)), Ca = 10 (рис. 14(б)) и Ca = 100 (рис. 14(в)), возмущения в течении жидкостей и величина “пальцев” прямо зависит от капиллярного числа Ca – чем больше Ca, тем больше неустойчивость. Также видим, что при увеличении капиллярного числа фронт вытеснения размывается меньше по оси z, что приводит к образованию локальных “пальцев”, распределенных по всему фронту вытеснения. Однако заметим, что с течением времени все локальные “пальцы”, распределенные по пласту, смещаются в нижнюю часть пласта под действием силы гравитации – и в конечном итоге, при позволяющей длине пласта (большей, чем в рассматриваемой модели) фронт вытеснения для случаев *Ca* = 10 и *Ca* = 100 примет клинообразный вид, который мы можем видеть при *Ca* = 1 (рис. 14(а)).

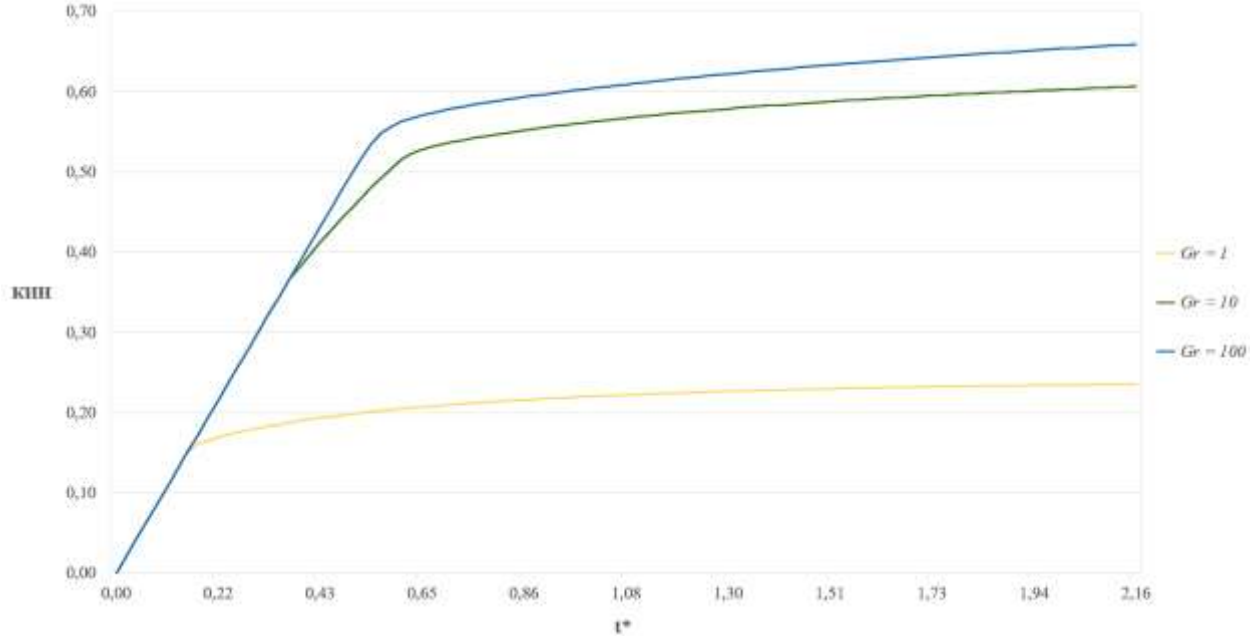


Рисунок 13 – КИН от безразмерного времени при варьировании гравитационного числа Gr

Отдельное внимание стоит уделить расчету, изображенному на рисунке 14(в). Напомним, что этот расчет был смоделирован при M = 50, Ca = 100, Gr = 10. По “пальцу”, прилегающему к нижней границе пласта с течением времени пробегают волны насыщенности фазы воды. Такое явление связано с низким капиллярным давлением и высокой разностью плотностей фаз. “Пальцы”, образующиеся в верхней части пласта из-за неблагоприятного соотношения вязкостей, поочередно сливаются с нижним “пальцем” под действием гравитации, что приводит к росту скорости развития неустойчивости в нижней половине пласта и расширению зоны перемешивания.

Предположение подтверждается графиком (рис. 15), на котором показана зависимость КИН (коэффициент извлечения нефти) от безразмерного времени. При Ca = 100 КИН к моменту прорыва достигает *0,51*, при Ca = 10 – *0,52*, при Ca = 1 – *0,53*. Исходя из данных, представленных на графике, можем сделать вывод, что нефтедобыча наиболее эффективна при меньших значениях числа Ca.

3. Влияние вязких сил на устойчивость течения.

Были проведены расчеты при одинаковом значении гравитационного числа Gr = 10 и капиллярного числа Ca = 10. Всего было проведено 4 расчета: при соотношении вязкостей M = 10, при M = *25*, при M = *50* и при M = *70*. Как видно из рисунка 16, на котором представлен процесс вытеснения нефти, интенсивность развития возмущений и величина зоны перемешивания также напрямую зависят от M – при увеличении отношения вязкостей M наблюдаем более частое образование вязких “пальцев” на фронте вытеснения.

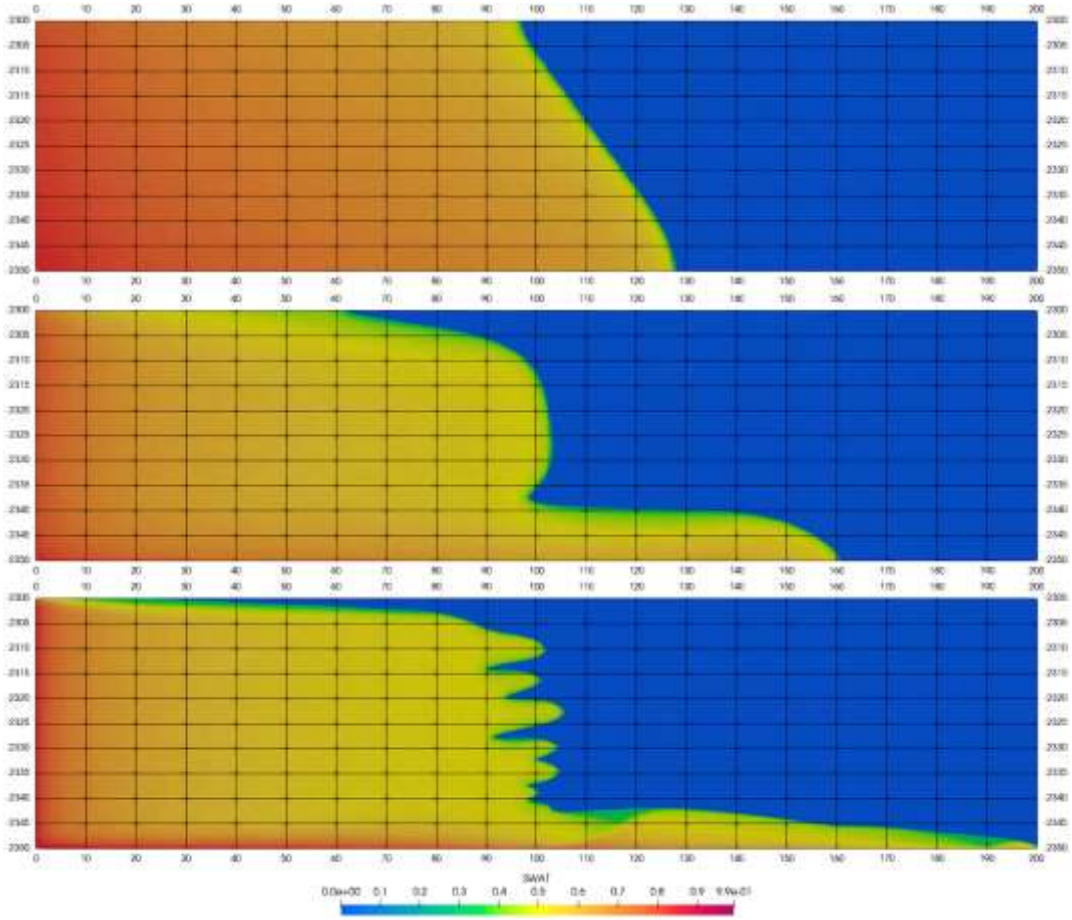


Рисунок 14 – Формирование неустойчивости при различных значениях капиллярного числа Ca: а) Ca = 1, б) Ca = 10, в) Ca = 100

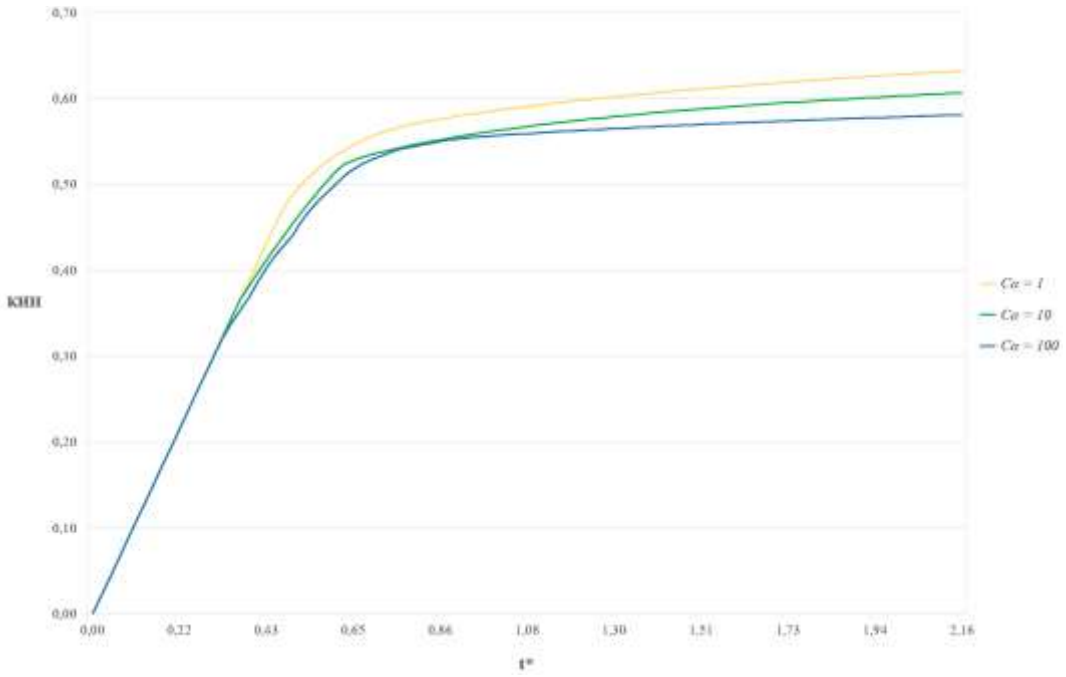


Рисунок 15 – КИН от безразмерного времени при варьировании капиллярного числа Ca

Рассмотрим рисунок 17, на котором представлена зависимость КИН от безразмерного времени. При M = 70 значение КИН к моменту прорыва достигает *0,51*, при M = 50 – *0,52*, при M = 25 – *0,54*, при M = 10 – *0,56*. Исходя из данных, представленных на графике, можем сделать вывод, что нефтедобыча наиболее эффективна при меньших значениях числа M.

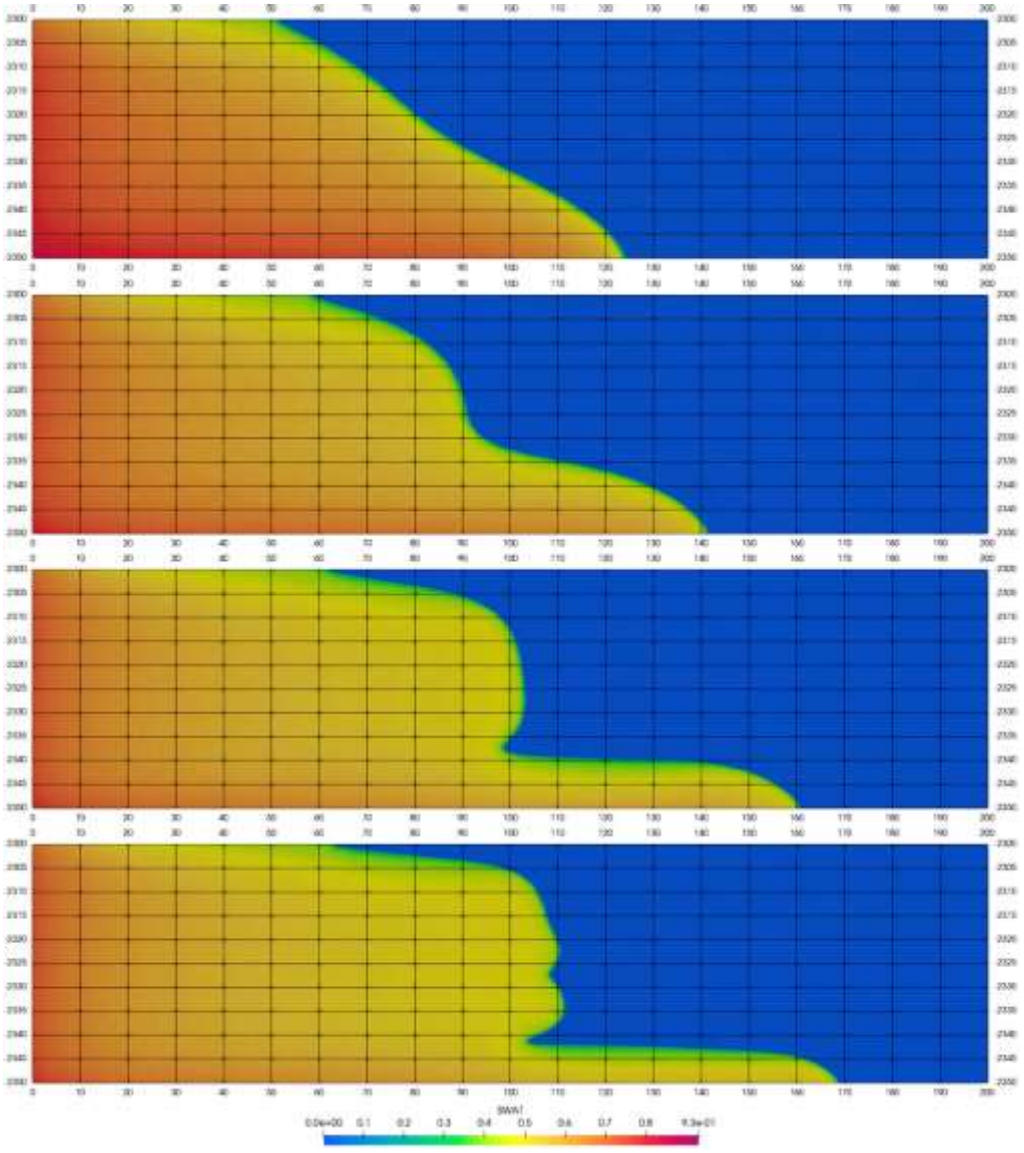


Рисунок 16 – Формирование неустойчивости при различных значениях соотношения вязкостей M: а) M = 10, б) M = 25, в) M = 50, г) M = 70

Заключение

Эффекты, характеризующиеся значением параметров *Ca*, *Gr* и *M*, определяют режим и устойчивость фронта вытеснения нефти водой. Гравитационное число *Gr* отвечает за вертикальную структуру потока: при малых значениях *Gr* (доминирование силы тяжести) формируется клинообразный фронт, так как плотная вода стекает к основанию пласта, что

приводит к раннему прорыву и минимальному коэффициенту извлечения нефти. Капиллярное число *Ca* характеризует баланс вязких и капиллярных сил: при больших значениях *Ca* (преобладание вязких сил) фронт слабо размывается по вертикали [7], порождая длинные и тонкие “пальцы”, на нижнем из которых из-за высокой подвижности могут возникать волны насыщенности. Напротив, малые значения *Ca* стабилизируют процесс за счет капиллярной диффузии, превращая острые “пальцы” в широкие капиллярные образования или полностью выравнивая фронт. Параметр *M* (отношение вязкостей) выступает общим катализатором неустойчивости: его рост ускоряет зарождение и развитие “пальцев” при любых режимах, существенно увеличивая длину зоны перемешивания к моменту прорыва. Из результатов проведенных расчетов следует, что вытеснение наиболее эффективно при больших значениях гравитационного числа *Gr* и при малых значениях капиллярного числа *Ca* и отношения вязкостей *M*.

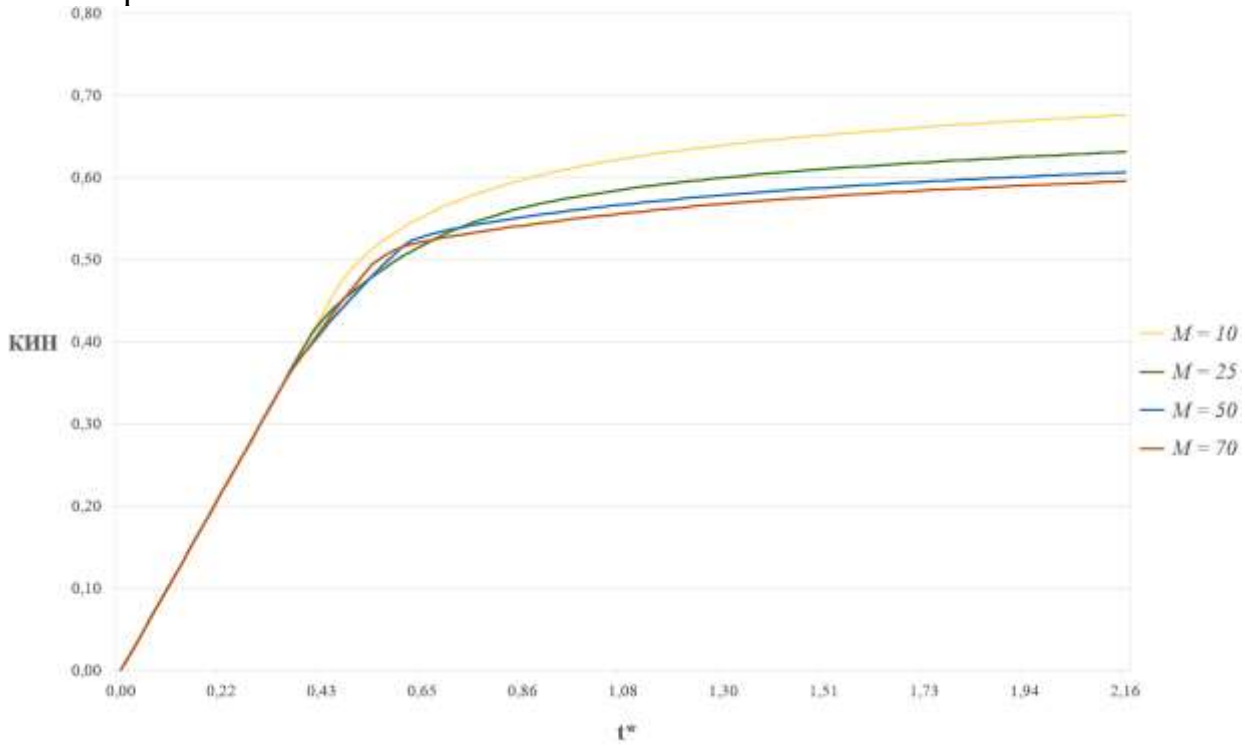


Рисунок 17 – КИН от безразмерного времени при варьировании соотношения динамических вязкостей Gr

Список литературы:

1. Buckley S. E., Leverett M. C. Mechanism of fluid displacement in sands // Transactions of the AIME, 1942. – № 146 (1). – P. 107-116. DOI: 10.2118/942107-G

2. Homsy G. M. Viscous fingering in porous media // Annual review of fluid mechanics, 1987. – Vol.19 – P. 271-311. DOI: 10.1146/annurev.fl.19.010187.001415

3. Riaz A., Tchelepi HA. Numerical simulation of immiscible two-phase flow in porous media // Physics of Fluids, 2006. – Vol.18, No.1.

4. Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик - Движение жидкостей и газов в природных пластах // Недра, 1984. – 211 с.
5. Afanasyev A. A. Hydrodynamic Modelling of Petroleum Reservoirs using Simulator MUFITS / Energy Procedia, 2015. – Vol.76. – P. 427-435. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.861
6. Zakirov T. R., Khramchenkov M. G. Characterization of two-phase displacement mechanisms in porous media by capillary and viscous forces estimation using the lattice Boltzmann simulations // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Vol. 184. – 106575 p.
7. Amir Riaz and Hamdi HA. Linear stability analysis of immiscible two-phase flow in porous media with capillary dispersion and density variation // Physics of Fluids, 2004
8. Saffman P. G., Taylor G. I. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 1958. – № 245 (1242). – 312-329. DOI: 10.1098/rspa.1958.0085
9. Lenormand R., Touboul E., Zarcone C. Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media // Journal of Fluid Mechanics, 1988. – № 189. – P. 165-187. DOI: 10.1017/S0022112088000953
10. Chen Z., Huan G., Ma Y. Computational methods for multiphase flows in porous media / SIAM, 2006. – 531 p. DOI: 10.1137/1.9780898718942

УДК 502:631

Тан Кэрань, Ван Бошуай, Цзэн Ясинь
Таншаньский педагогический университет, Таншань, Китай

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВОДООХРАННЫХ И ПОЧВОЗАЩИТНЫХ ФУНКЦИЙ ЭКОСИСТЕМ НА СКЛОНОВЫХ ЗЕМЛЯХ ХОЛМИСТЫХ РАЙОНОВ

Аннотация: склоновые земли в холмистых районах являются зонами интенсивной водной эрозии, поэтому оценка их водоохранных и почвозащитных функций имеет критическое значение для экологической безопасности и устойчивого землепользования. На основе широко используемых моделей, таких как RUSLE и InVEST, и с учётом характерных особенностей коротких и крутых склонов, а также сложной структуры землепользования, разработана многоуровневая оценочная структура, сочетающая учёт процессов и эффектов. Структура включает три уровня: цель – критерии – показатели. Уровень критериев содержит три компонента: сохранение почвы, водоудерживающая способность и поддержание экологического равновесия. Уровень показателей включает факторы эрозионной активности дождя, эродируемости почв, рельефа, растительного покрова и почвозащитных мероприятий. Весовые коэффициенты определяются комбинированным методом AHP и энтропийного взвешивания. Исследование показывает, что предложенная модель эффективно отражает пространственную дифференциацию функций и может служить основой для планирования почвозащитных мероприятий и экологической реабилитации.
Ключевые слова: холмистые районы; склоновые экосистемы; водоохранные и почвозащитные функции; оценочная модель; RUSLE; InVEST.

Склоновые земли в холмистых районах являются важным типом земельных ресурсов Китая, а также наиболее подверженным водной эрозии. Пахотные склоны, будучи основным источником эрозии в холмистых районах, не только снижают продуктивность земель, но и вызывают целый ряд экологических проблем, таких как заиливание рек и диффузное загрязнение. Научная оценка водоохранных и почвозащитных функций экосистем на склоновых землях холмистых районов имеет важное теоретическое и практическое значение для точного выявления зон риска эрозии, оптимизации размещения почвозащитных мероприятий и обеспечения региональной экологической безопасности [1].

В условиях глобального изменения климата и интенсификации хозяйственной деятельности проблема водной эрозии на склоновых землях холмистых районов приобретает особую остроту. По данным ФАО, ежегодные потери почвы от эрозии в мире достигают 75 млрд тонн, причём значительная доля приходится на горные и холмистые агроландшафты. В Китае холмистые районы занимают около 40 % территории страны, и многие

из них характеризуются высокой распаханностью и частыми ливневыми дождями, что создаёт благоприятные условия для развития эрозионных процессов. Особенно это актуально для юго-восточных провинций, где муссонный климат обусловливает высокую интенсивность осадков и частые тайфуны, а антропогенное воздействие в виде распашки склонов под чайные плантации и цитрусовые сады усиливает эрозионную уязвимость. Традиционные методы оценки, как правило, либо фокусируются только на количестве смытой почвы, либо рассматривают отдельные экосистемные услуги изолированно, что не позволяет учесть синергетические эффекты между водоудержанием, защитой почвы и поддержанием биоразнообразия. Поэтому разработка интегральной модели, способной объединить процессные и функциональные подходы, является насущной задачей для устойчивого управления земельными ресурсами в регионах с расчленённым рельефом.

В последние годы отечественные и зарубежные учёные провели многочисленные исследования по оценке водоохранных и почвозащитных функций, разработав ряд моделей, среди которых наиболее известны RUSLE, InVEST, CSLE, WEPP и другие. Однако существующие модели в основном ориентированы на отдельные аспекты или конкретные типы территорий, и комплексная оценка, учитывающая сложность и многофункциональность склоновых экосистем холмистых районов, остаётся недостаточной. Цель данной работы – разработать комплексную оценочную модель водоохранных и почвозащитных функций, адаптированную для экосистем склоновых земель холмистых районов, что позволит обеспечить методологическую поддержку для управления водными и земельными ресурсами и охраны природы на региональном уровне.

Экосистемы склоновых земель холмистых районов обладают следующими типичными характеристиками. Во-первых, расчленённый рельеф и значительные уклоны, обусловливающие короткую длину склонов и крутизну, что способствует быстрому стоку поверхностных вод и высокой эрозионной силе. Во-вторых, сложное и разнообразное землепользование: пахотные склоны, лесные угодья, сады и луга чередуются, при этом интенсивность эрозии существенно различается в зависимости от типа использования. В-третьих, растительный покров имеет ярко выраженную сезонную динамику, фактор растительного покрова значительно колеблется в течение года, а его временная корреляция с эрозионной активностью дождей определяет пространственно-временную структуру фактического объёма эрозии [2].

Указанные особенности определяют необходимость одновременного учёта трёх уровней потребностей при оценке водоохранных и почвозащитных функций склоновых земель холмистых районов. Во-первых, на процессном уровне требуется точное описание физических процессов и движущих

механизмов склоновой эрозии. Во-вторых, на функциональном уровне необходима комплексная оценка множества экосистемных услуг, включая сохранение почвы и водоудерживающую способность. В-третьих, на управленческом уровне результаты оценки должны служить основой для конкретного размещения почвозащитных мероприятий и определения приоритетных зон.

Исходя из этих потребностей, в данной работе предлагается трёхуровневая оценочная структура «цель – критерии – показатели». Целевой уровень представляет собой комплексный индекс водоохранных и почвозащитных функций экосистем склоновых земель холмистых районов (Soil and Water Conservation Function Index, SWCFI). Критериальный уровень включает три измерения водоохранных и почвозащитных функций: способность к сохранению почвы, отражающую потенциальную способность экосистемы уменьшать эрозию; водоудерживающую способность, характеризующую задержание, инфильтрацию и регулирование осадков экосистемой; и способность к поддержанию экологического равновесия, отражающую состояние растительного покрова, качество почвы и другие экологические основы, обеспечивающие водоохранные и почвозащитные функции [3].

Выбор показателей на уровне индикаторов основывается на принципах научной обоснованности, операциональности и региональной адаптивности. Ключевые показатели включают:

Фактор эрозионной активности дождя – отражает потенциальную способность осадков вызывать эрозию почвы в регионе; может быть рассчитан на основе годовой суммы осадков или кинетической энергии дождя.

Фактор эродируемости почвы – характеризует чувствительность почвы к эрозии и тесно связан с её физико-химическими свойствами, такими как гранулометрический состав, содержание органического вещества и водопроницаемость.

Топографический фактор – комплексно отражает усиливающее влияние длины склона и крутизны склона на концентрацию стока и эрозионную силу; является наиболее важным морфометрическим параметром при оценке склоновых земель в холмистых районах.

Фактор растительного покрова – отражает защитное действие наземной растительности и сельскохозяйственных культур на почву; характеризуется выраженной сезонной динамикой.

Фактор почвозащитных мероприятий – характеризует снижение потерь почвы за счёт инженерных и агротехнических мер, таких как террасирование, живые изгороди, нулевая обработка и т. д.

Для практической реализации модели важно детализировать методы расчёта каждого показателя на основе доступных данных. Фактор эрозионной

активности дождя (R) может быть вычислен по формуле Висмайера–Смита с использованием данных ежедневных осадков метеостанций или спутниковых продуктов с высоким разрешением. Фактор эродируемости почвы (K) определяется по номограмме с учётом гранулометрического состава, содержания органического вещества и водопроницаемости; для холмистых районов юга Китая характерны малогумусные краснозёмы с повышенными значениями K. Топографический фактор (LS) требует особого внимания из-за коротких крутых склонов; вместо стандартной формулы RUSLE рекомендуется использовать поправки, учитывающие влияние профиля склона на аккумуляцию наносов. Фактор растительного покрова (C) получают из рядов NDVI по данным MODIS или Sentinel-2, а фактор почвозащитных мероприятий (P) – через классификацию землепользования и полевые обследования террас и контурной обработки. Интеграция этих данных в ГИС позволяет построить факторные слои с регулярной сеткой 30 м. Для получения комбинированных весов используется мультипликативная нормализация, при которой итоговый вес каждого фактора равен произведению субъективного и объективного весов, делённому на сумму таких произведений по всем факторам; энтропийный вес при этом вычисляется на основе матрицы нормализованных значений показателей по пространственным ячейкам.

Для устранения влияния различий в размерностях на комплексную оценку все показатели подвергаются нормализации методом минимаксного масштабирования (нормировка по размаху).

Определение весовых коэффициентов показателей является ключевым этапом построения оценочной модели. Как субъективные, так и объективные методы взвешивания по отдельности имеют определённые ограничения: первые чрезмерно полагаются на экспертный опыт, вторые могут отрываться от физического смысла показателей. В данной работе предлагается комбинированный метод, объединяющий аналитический иерархический процесс и метод энтропийных весов. Сначала с помощью AHP определяются субъективные веса, отражающие знания и опыт экспертов в предметной области; затем методом энтропии вычисляются объективные веса, основанные на информативности данных показателей; итоговые комбинированные веса получаются путём мультипликативного синтеза или линейного взвешивания.

Расчёт комплексного индекса SWCFI производится с использованием многокритериальной линейной взвешенной функции:

"SWCFI=" ∑_"i=1" ^"n" ▒"ω" _"i" "·" "X" _"I"

Где "ω" _"i" — комбинированный вес i-го показателя, а "X" _"i" — нормализованное значение i-го показателя. Значение SWCFI находится в диапазоне [0, 1]; чем выше значение, тем сильнее водоохранная и почвозащитная функция.

Данная оценочная модель может быть реализована в пространственном масштабе на региональном уровне с использованием ГИС и данных дистанционного зондирования. Путём наложения и взвешенного суммирования пространственных слоёв каждого факторного показателя можно построить карту распределения классов водоохранной и почвозащитной функции, выделяя зоны чрезвычайно высокой, высокой и средней значимости. Практическое применение в бассейне реки Сяолинхэ (низкогорный и холмистый район) показало, что пологие склоны с уклоном от 5° до 15° часто относятся к зонам чрезвычайно высокой значимости водоохранной и почвозащитной функции, при этом лесные угодья имеют наиболее выраженное преимущество по сравнению с другими типами землепользования [4].

В будущем исследования могут быть углублены по следующим направлениям: во-первых, усиление способности модели к совместному моделированию гидрологических процессов и механизмов эрозии на склоновом масштабе; во-вторых, изучение применения методов машинного обучения (например, случайного леса, нейронных сетей обратного распространения) для отбора показателей и оптимизации весов; в-третьих, содействие интеграции оценочной модели с управленческими инструментами, такими как экологическая компенсация и территориальное планирование, для повышения её ценности при принятии решений [5].

Заключение

В данной работе, с учётом специфики склоновых экосистем в холмистых районах, построена комплексная оценочная модель водоохранных и почвозащитных функций, охватывающая три аспекта: сохранение почвы, водоудерживающую способность и поддержание экологического равновесия. Модель имеет трёхуровневую структуру «цель – критерии – показатели»; в качестве ключевых показателей выбраны фактор эрозионной активности дождя, фактор эродируемости почвы, топографический фактор, фактор растительного покрова и фактор почвозащитных мероприятий. Весовые коэффициенты определяются комбинированным методом AHP и энтропийного взвешивания, а комплексный функциональный индекс рассчитывается с помощью многокритериальной линейной взвешенной функции. Предложенная модель сочетает учёт физических механизмов процессов и комплексных эффектов, позволяет эффективно отражать пространственную дифференциацию водоохранных и почвозащитных функций на склоновых землях холмистых районов и служит научной основой для регионального планирования почвозащитных мероприятий и принятия решений по экологической реабилитации.

Список литературы:

1. Кузнецова, Э. А. Функции экосистем в зоне инженерного освоения / Э. А. Кузнецова // Экологическое равновесие: природное и историко-культурное наследие, его сохранение и популяризация : Материалы VI международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 12 ноября 2015 года / Т.С. Комиссарова (отв. ред.), Е.А. Гаджиева, А.В. Скворцов (отв. секретарь). – Санкт-Петербург: Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина, 2015. – С. 133-136.
2. Мустафин Р. Ф., Хайретдинов А. Ф. Водоохранные леса вдоль малых озер и водохранилищ их экологическая роль // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2016. – №44.
3. Гао Хуэй. Исследование устойчивого развития водных ресурсов в Китае // Инновации и инвестиции. – 2023. – №8.
4. В. Н. Трофимук, Д. Н. Седрисев, А. В. Рубинская, А. А. Петрова Обеспечение экологической безопасности на плотинах гидроэлектростанций // СМТ. – 2015. – №3 (27).
5. Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н, Нарожняя А. Г. Применение бассейновой концепции природопользования для почвоводоохранного обустройства агроландшафтов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – №1-9.

УДК 533.9

Захаров В. Ю.
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

НЕЛИНЕЙНЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ЗАПЫЛЁННОЙ ПЛАЗМЕ С УЧЁТОМ ЗАРЯДКИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ И ПОТОКОВ ИОНОВ

Аннотация. В статье теоретически исследованы нелинейные ударные волны в запылённой плазме с учётом нестационарной зарядки пылевых частиц и направленных потоков ионов. Показано, что зарядка создаёт дополнительную диссипацию, а дрейф ионов приводит к немонотонным ударным структурам. Предложена аппроксимация коэффициента диссипации, зависящего от маховского числа ионного потока. Результаты применимы для расчёта пылевого загрязнения в термоядерных установках и нормативов предельных концентраций пыли.

Ключевые слова: запылённая плазма, ударные волны, зарядка пылевых частиц, потоки ионов, диссипация, маховское число, сверхзвуковые потоки, токамак.

Состояние современной физики низкотемпературной плазмы характеризуется повышенным интересом к системам, содержащим макрочастицы конденсированной дисперсной фазы, традиционно именуемой пылевой компонентой. Запылённая плазма является объектом исследований как в фундаментальной науке (физика космических объектов, астрофизика молекулярных облаков), так и в прикладных областях, включая технологии микроэлектроники, плазменные реакторы синтеза функциональных покрытий и системы термоядерной энергетики с диверторными узлами.

Ключевой особенностью таких систем является способность пылевых частиц приобретать значительный электрический заряд за счёт потоков заряженных компонент плазмы. В условиях наличия направленного движения ионов, обусловленного внешними электрическими полями или градиентами давлений, процесс зарядки приобретает выраженный анизотропный характер. Как следствие, коллективные явления, в частности распространение нелинейных волн, демонстрируют качественно новое поведение по сравнению с бес пылевой плазмой. Ударные волны, представляющие собой структуры с резким изменением гидродинамических параметров, являются одним из наиболее ярких проявлений нелинейности. В запылённой плазме за счёт наличия дополнительной диссипации, связанной с «трением» между плазменной средой и пылевыми частицами, а также с инерционностью процессов зарядки, ударные волны могут существовать в диапазоне параметров, где в обычной плазме они бы затухали [1].

Рассматривается трёхкомпонентная слабоионизованная плазма, состоящая из электронов с температурой температурой T_e, однозарядных ионов с температурой T_i и массивных пылевых частиц одинакового радиуса r_d. Пылевые частицы предполагаются сферическими, с диэлектрической проницаемостью, существенно превышающей единицу. Плазма является квазинейтральной в невозмущённом состоянии. Для описания системы используется гидродинамическое приближение с учётом дискретности заряда пылевых частиц в рамках модели орбитального движения (теория Орбитального движения – OML).

В запылённой плазме зарядка дисперсных частиц происходит преимущественно за счёт захвата электронов и ионов их поверхностью, причём в газоразрядных условиях частицы обычно приобретают отрицательный заряд вследствие более высокой подвижности электронов. Однако под действием термоэлектронной или фотоэлектронной эмиссии знак заряда может изменяться на положительный, что существенно перестраивает коллективные взаимодействия. Процесс зарядки описывается в рамках теории орбитального движения или её упрощённого варианта OML, применимого при условии, когда размер частиц и дебаевский радиус экранирования значительно меньше длины свободного пробега. В режиме высоких давлений используется диффузионно-дрейфовое приближение, учитывающее столкновительный характер переноса. Важно подчеркнуть, что заряд пылевой частицы не является фиксированной величиной: он изменяется во времени и пространстве, а также испытывает флуктуации из-за случайного характера взаимодействия с заряженными компонентами плазмы. Именно эта нестационарность зарядки служит одним из ключевых источников диссипации в нелинейных ударных волнах [2].

Исходная система уравнений включает уравнения непрерывности и движения для ионов и пылевой фракции, уравнение Пуассона и уравнение баланса заряда на пылевой частице:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (n_i u_i) = R_i - L_i, \\ \dfrac{\partial u_i}{\partial t} + (u_i \cdot \nabla) u_i = \dfrac{-Z_i e}{m_i} \nabla \varphi - \dfrac{1}{m_i n_i} \nabla p_i - \nu \;\; u_i - \nu_{id}(u_i - u_d), \\ \dfrac{\partial n_d}{\partial t} + \nabla \cdot (n_d u_d) = 0, \\ m_d n_d \left(\dfrac{\partial u_d}{\partial t} + (u_d \cdot \nabla) u_d \right) = Z_d e n_d \nabla \varphi - \nabla p_d - m_d n_d \nu_{dn} u_d, \\ \nabla^2 \varphi = -4\pi e (n_i - n_e - Z_d n_d), \\ \dfrac{d\langle Z_d \rangle}{dt} = I_e + I_i, \end{cases}$$

где:

- n_i, n_d, n_e – концентрации ионов, пылевых частиц и электронов соответственно;
- u_i, u_d – гидродинамические скорости ионов и пылевой фракции;
- φ – электрический потенциал;
- $Z_i = +1$ – кратность заряда ионов (однозарядные);
- e – элементарный заряд;
- m_i, m_d – массы иона и пылевой частицы;
- $p_i = n_i T_i, p_d$ – давления ионов и пыли (T_i – температура ионов в энергетических единицах);
- ν , ν_{id}, ν_{dn} – частоты столкновений ионов с нейтралами, ионов с пылью и пыли с нейтралами соответственно;
- R_i, L_i – источники и стоки ионов (ионизация и рекомбинация на пыли);
- Z_d – переменный заряд пылевой частицы (в единицах e), $\langle Z_d \rangle$ – его среднее значение;
- I_e, I_i – потоки электронов и ионов на поверхность пылевой частицы.

Уравнение состояния для ионов принято изотермическим: $p_i = n_i T_i$. Для замыкания системы используется модель орбитального движения (OML) для расчёта токов I_e и I_i с учётом дрейфовой скорости ионов.

Особое внимание уделяется учёту потоков ионов. В предлагаемой модели направленное движение ионов в лабораторной системе координат учитывается путём введения эффективной температурной поправки и асимметрии сечений зарядки. При наличии маховского числа

$$M_i = u_i / v_{Ti}$$

для ионного саундеровского потока выражение для ионного тока модифицируется путём интегрирования по распределению с дрейфом. Полученные интегралы выражаются через функции Бесселя мнимого аргумента, что позволяет корректно описать увеличение тока при увеличении скорости потока ионов вследствие эффекта «обдува» [3].

Для исследования стационарных ударных волн используется метод перехода в систему координат, движущуюся со скоростью ударного фронта D. Производится сведение системы уравнений к обыкновенным дифференциальным уравнениям с последующим фазовым анализом. Показано, что условием существования ударной волны является выполнение обобщённого аналога условия эволюционности Петерсона – Оппенгейма, модифицированного для плазмы с дисперсной фазой.

При отсутствии потоков ионов и при постоянном заряде пылевых частиц (модель фиксированного Z_d) ударная волна имеет классический вид

монотонного фронта. Диссипация обусловлена вязкостью, связанной с зарядкой. Однако при введении даже небольших направленных скоростей ионов (превышающих 0,3 от тепловой скорости ионов) наблюдается смена режима: ударный фронт приобретает колебательный характер. В области пространственного осциллятора возникают предвестники ударной волны – мелкомасштабные периодические струкции, затухающие на расстояниях порядка нескольких дебаевских радиусов. Ключевым результатом работы является вывод о том, что нестационарная зарядка пылевых частиц в присутствии потока ионов порождает дополнительный канал диссипации, имеющий пороговый характер. При превышении скорости потока некоторого критического значения, которое для типичных параметров лабораторной запылённой плазмы формул: ($n_e \approx 10^9$ см$^{-3}$, $T_e \approx 3$ эВ, $r_d \approx 1$ мкм) составляет $u_i \approx 2{,}2 \cdot 10^5$ см/с, происходит резкое увеличение ширины ударного фронта на 40-60 процентов. Этот эффект объясняется тем, что направленный поток ионов приводит к асимметрии распределения заряда на поверхности пылевой частицы, возникновению дипольного момента и, как следствие, дополнительных сил, действующих на соседние частицы.

Проведённое исследование позволяет сделать ряд принципиальных выводов о природе нелинейных ударных волн в запылённой плазме с учётом зарядки пылевых частиц и потоков ионов. Прежде всего установлено, что учёт нестационарной зарядки пылевых частиц принципиально меняет структуру ударной волны, причём игнорирование этого фактора, как это часто делается в упрощённых моделях с постоянным зарядом, приводит к завышению скорости ударной волны в среднем на 15-25 процентов. Данное расхождение является систематическим и не может быть скомпенсировано вариацией других параметров, что доказывает необходимость включения кинетики зарядки в базовое описание ударных процессов [4].

Кроме того, установлено, что направленный поток ионов выступает в роли самостоятельного структурообразующего фактора. В отличие от случая изотропной плазмы, наличие дрейфовой скорости ионов вызывает возникновение немонотонных ударных структур, характеризующихся затухающими осцилляциями параметров за фронтом волны. Амплитуда таких осцилляций может достигать 30 процентов от величины основного скачка, что необходимо учитывать при конструировании зондовых диагностических систем, поскольку классические методы усреднения дают при этом недопустимо большую погрешность. Для инженерного моделирования плазменных реакторов с циркулирующим потоком пыли в работе предложена аналитическая аппроксимация для эффективного коэффициента диссипации, зависящего от маховского числа ионного потока и отношения температуры ионов к температуре электронов. Данная аппроксимация может быть

непосредственно встроена в существующие вычислительные коды, не требуя модификации их численных схем [5].

Особого внимания заслуживает режим сверхзвуковых потоков ионов, когда маховское число M_i превышает единицу. В этом случае формируются двойные ударные слои, в которых скачок потенциала дополняется локальным перезарядом пылевых частиц. Такой режим не имеет аналога в беспылевой плазме и представляет особый интерес для плазменных сепараторов фракций, где требуется разделение частиц по зарядовому состоянию в условиях интенсивного обтекания ионным потоком.

Практическая значимость работы определяется возможностью уточнения методик расчёта пылевого загрязнения внутренних стенок токамаков, а также созданием научной основы для нормативных требований к предельно допустимым концентрациям пыли в рабочих камерах плазменных установок. Полученные результаты могут быть использованы при разработке изменений в отраслевые стандарты, регулирующие эксплуатацию оборудования с высокочастотным и дуговым плазмотронами. В заключение следует отметить, что дальнейшее развитие модели предполагает включение эффектов фазовых переходов на поверхности пылевых частиц и учёт полидисперсности пылевой компоненты, что позволит приблизить теоретическое описание к реальным условиям технологических и космических приложений.

Список источников:

1. Попель С.И., Минг Ю., В.Н. Цытович О новом виде ударных волн в пылевой плазме // Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева Российской Академии Наук. – 1996. – №11-12. – С. 3-8.
2. Аль Наджм М.Н., Прудских В.В. Электродинамические свойства ударных волн непрерывного типа в запыленной плазме // Известия высших вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: «Естественные науки». – 2015. – №4 (188). – С. 18-24.
3. Трухачев Ф. М., Болтнев Р. Е., Алексеевская А. А., Васильев М. М., Петров О. Ф. Нелинейные пыле-акустические волны в околоидеальной (газоподобной) криогенной пылевой плазме тлеющего разряда // Физика плазмы. – 2023. – Т. 49, № 1. – С. 85-91. DOI: 10.31857/S0367292122600923 EDN: BHYNKE
4. Шелестов А.С., Сысун А.В. Моделирование процесса зарядки пылевой частицы в плазме низкого давления методом молекулярной динамики // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 12. – С. 74-76. EDN: ISDINT
5. Сысун В.И., Хахаев А.Д., Олещук О.В., Шелестов А.С. Формирование ионного потока на пылевую частицу в плазме // Современные наукоемкие технологии. – 2005. – № 3. – С. 30-34. EDN: JJYNPJ

УДК 553.98

Жабяк А. Р.
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ВЕРХНЕКОСТИНСКОГО РЕЗЕРВУАРА СУХОТУНГУССКОГО ВАЛА И ФАКТОРЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛОВУШЕК УГЛЕВОДОРОДОВ

Аннотация. В статье рассматриваются особенности геологического строения верхнекостинского резервуара Сухотунгусского вала, расположенного в пределах Курейско-Бакланихинского мегавала западной части Сибирской платформы. На основе анализа материалов глубокого бурения, геофизических исследований скважин, данных испытаний, сейсморазведочных материалов и результатов геологического моделирования показано, что резервуар характеризуется высокой латеральной неоднородностью и мозаичным развитием вторичных карбонатных коллекторов трещинно-кавернозного типа. Показано, что локализация перспективных ловушек углеводородов контролируется не только структурным положением, но и развитием зон вторичного разуплотнения, доломитизации, трещиноватости и тектонической переработки пород.

Ключевые слова: Сухотунгусский вал, верхнекостинский резервуар, карбонатный коллектор, трещинно-кавернозный коллектор, структурно-тектоническая ловушка, Сибирская платформа, Курейско-Бакланихинский мегавал, 3D геологическое моделирование.

Введение

Лено-Тунгусская нефтегазоносная провинция является одной из крупнейших древних нефтегазоносных провинций Сибирской платформы. Основные перспективы нефтегазоносности в её пределах связаны с подсолевыми рифейскими, вендскими и нижнекембрийскими комплексами, характеризующимися сложным геологическим строением и значительным потенциалом для выявления залежей углеводородов [1, 2].

Региональные закономерности строения и нефтегазоносности Сибирской платформы, включая роль рифейско-вендских и нижнекембрийских комплексов, подробно рассмотрены в обобщающих работах А. Э. Конторовича и соавторов [7].

В северных районах провинции существенный интерес представляют карбонатные толщи верхнего рифея, венда и кембрия, в которых широко развиты вторичные коллекторы, связанные с трещиноватостью, кавернозностью, доломитизацией и тектонической переработкой пород [3].

Одним из перспективных тектонических элементов западной части Сибирской платформы является Курейско-Бакланихинский мегавал. В его

пределах Сухотунгусский вал выделяется наличием материалов глубокого бурения, сейсморазведочных работ и данных испытаний скважин, хотя общая степень геолого-геофизической изученности территории остаётся ограниченной. Вал осложнён рядом локальных положительных структур, включая Подкаменное поднятие, Горный и Дьявольский купола. В пределах этих структур по данным бурения, испытаний скважин и геолого-геофизических исследований выявлены нефтегазопроявления, притоки углеводородов и интервалы развития коллекторов, что позволяет рассматривать данную территорию как перспективную для выявления локальных ловушек нефти и газа [4, 5].

Геологическое строение Сухотунгусского вала характеризуется высокой неоднородностью. На интерпретацию строения резервуаров существенно влияют разломно-блоковая организация территории, поздние тектонические деформации, вторичные процессы преобразования карбонатных пород, а также развитие интрузивных тел трапповой формации. Эти факторы осложняют как выделение коллекторов, так и прогноз распространения перспективных ловушек углеводородов [3, 6].

Особый интерес представляет верхнекостинский резервуар, для которого характерно мозаичное развитие вторичных карбонатных коллекторов трещинно-кавернозного типа. Проведённый комплексный анализ показывает, что такие коллекторы пространственно связаны с зонами тектонической переработки, доломитизации и неравномерного вторичного преобразования пород, а локализация перспективных ловушек требует комплексного анализа геолого-геофизических данных и применения интегрированного 3D геологического моделирования.

Цель статьи – выявить основные особенности строения верхнекостинского резервуара Сухотунгусского вала и определить факторы, контролирующие локализацию перспективных ловушек углеводородов.

Для достижения цели решались следующие задачи: анализ геолого-геофизической изученности территории; характеристика строения верхнекостинского резервуара; оценка роли вторичных процессов в формировании коллекторского пространства; выявление связи между структурным положением, развитием вторичных коллекторов и локализацией перспективных ловушек углеводородов.

Материалы и методы исследования

В основу исследования положены материалы глубокого бурения, данные геофизических исследований скважин, результаты испытаний, сейсморазведочные материалы, опубликованные геолого-геофизические данные по Турухано-Норильскому самостоятельному нефтегазоносному району, а также результаты построения трёхмерной геологической модели верхнекостинского резервуара. В ходе исследования выполнены корреляция

разрезов, уточнение стратиграфических разбивок, структурные построения и построение 3D геологической модели верхнекостинского резервуара.

Методическая схема исследования включала несколько последовательных этапов. На первом этапе выполнялся анализ опубликованных материалов по геологическому строению и нефтегазоносности района. На втором этапе изучались стратиграфические и тектонические особенности Сухотунгусского вала и прилегающих территорий. На третьем этапе проводились анализ и переинтерпретация данных ГИС, уточнение стратиграфических разбивок и построение корреляционных схем. Далее выполнялись интерпретация сейсморазведочных материалов, прослеживание отражающих горизонтов, выделение тектонических нарушений, построение структурных карт и анализ изменения структурного плана по разрезу. Завершающим этапом являлось построение трёхмерной модели и анализ распределения коллекторов и фильтрационно-ёмкостных свойств.

Пространственное положение глубоких скважин и сейсмических профилей, использованных при анализе верхнекостинского резервуара, показано на рис. 1.

Такой комплексный подход особенно важен для верхнекостинского резервуара, поскольку его строение не может быть корректно охарактеризовано только по отдельным скважинным данным. В условиях латерально неоднородных карбонатных толщ, разреженной сети глубоких скважин и сложного структурного строения достоверная интерпретация возможна только при совместном использовании бурения, ГИС, испытаний, сейсмики и геологического моделирования.

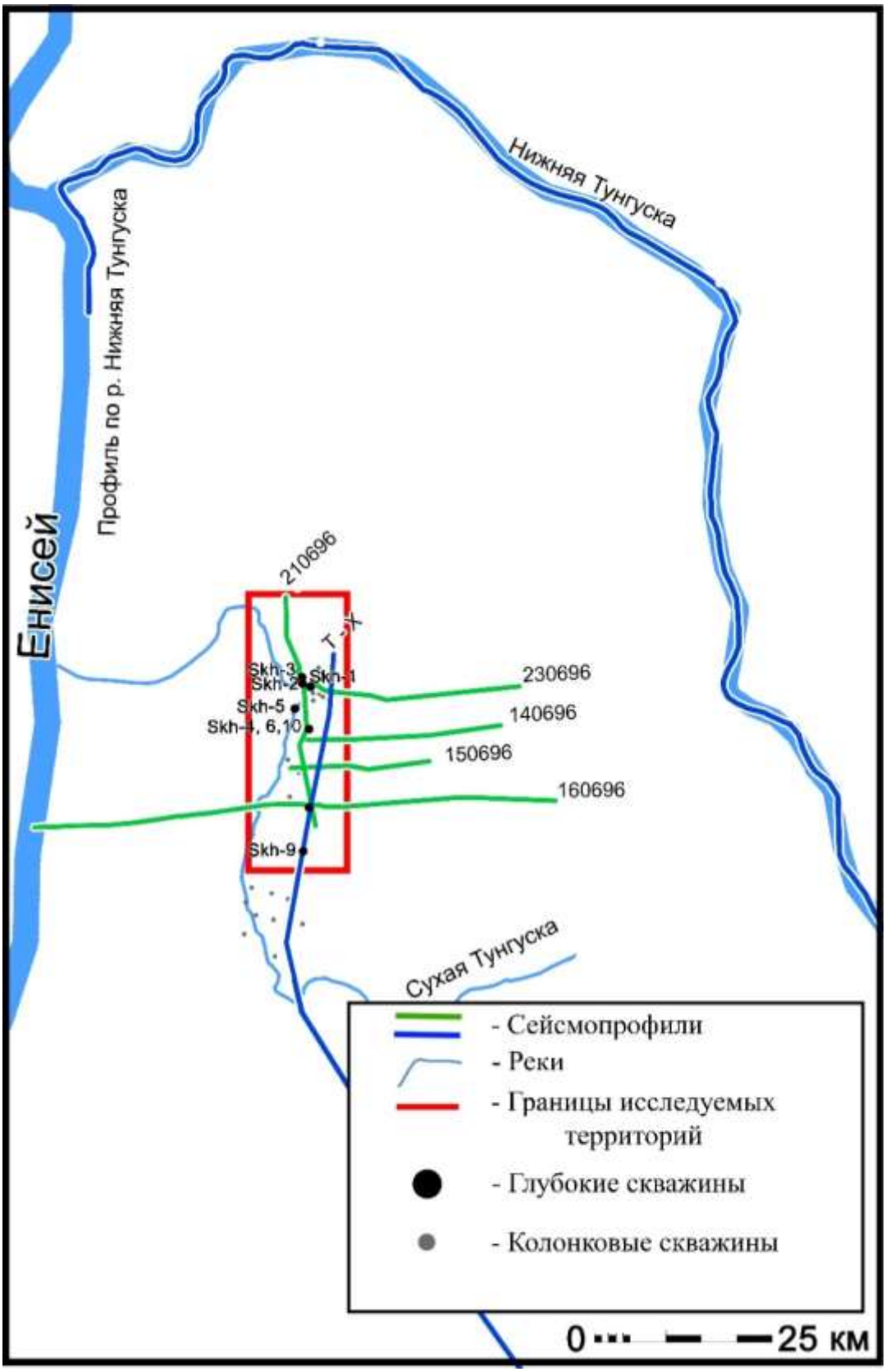


Рисунок 1. Схема изученности района исследования: положение глубоких скважин и сейсмических профилей Сухотунгусской площади.

Результаты исследования

Геологическое положение Сухотунгусского вала

Сухотунгусский вал расположен в пределах Курейско-Бакланихинского мегавала западной части Сибирской платформы. Территория относится к Туруханo-Норильскому самостоятельному нефтегазоносному району Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. Основные перспективы нефтегазоносности района связаны с вендскими и кембрийскими карбонатными комплексами, в пределах которых установлены притоки нефти, газа и пластовых вод [1, 2].

Сухотунгусский вал представляет собой сложнопостроенную положительную структуру, осложнённую локальными поднятиями. К основным локальным структурам относятся Подкаменное поднятие, Горный и Дьявольский купола. Эти структуры контролируют развитие преимущественно структурных и структурно-тектонических ловушек углеводородов.

По данным глубокого поискового бурения в пределах Сухотунгусской площади пробурены скважины, вскрывшие рифейские, вендские, кембрийские и палеозойские отложения. Результаты бурения позволили уточнить строение локальных поднятий, получить данные о коллекторских свойствах пород и установить характер флюидонасыщения. По отдельным скважинам получены притоки воды, нефти, газа и воды с растворённым газом, что подтверждает нефтегазоносность исследуемого разреза.

Скважины Сухотунгусская №1, №2 и №3 расположены в пределах Дьявольского поднятия; скважины №4, №6 и №10 – в пределах Горного купола; скважины №7, №8 и №9 – на Подкаменном поднятии; скважина №5 расположена между Дьявольским поднятием и Горным куполом. Такая пространственная организация скважинной информации позволяет сопоставлять особенности строения разреза в пределах разных локальных структур и оценивать связь коллекторских интервалов с положением в структурном плане.

Особенности строения верхнекостинского резервуара

Верхнекостинский резервуар относится к числу наиболее важных объектов для оценки перспектив нефтегазоносности Сухотунгусского вала. Его строение определяется сочетанием литологических, постседиментационных и тектонических факторов. В отличие от выдержанных терригенных пластов, верхнекостинский резервуар не образует равномерно распространённого коллекторского тела. Для него характерна высокая латеральная неоднородность, обусловленная мозаичным развитием вторичной ёмкости в карбонатных породах.

Основной тип коллектора верхнекостинского резервуара согласно исследованию керна – вторичный карбонатный коллектор трещинно-кавернозного типа. Формирование его фильтрационно-ёмкостного пространства связано преимущественно с трещинообразованием, кавернозностью, доломитизацией и вторичной тектонической переработкой пород. Эти процессы приводят к тому, что коллекторские свойства распределены в разрезе и по площади неравномерно. Наиболее перспективные зоны формируются там, где структурные условия сочетаются с развитием вторичного разуплотнения.

Межскважинная корреляция показывает, что основные признаки коллекторов и нефтегазопроявлений приурочены к кровельной части костинской свиты, при этом распространение коллекторских интервалов имеет неравномерный характер (рис. 2).

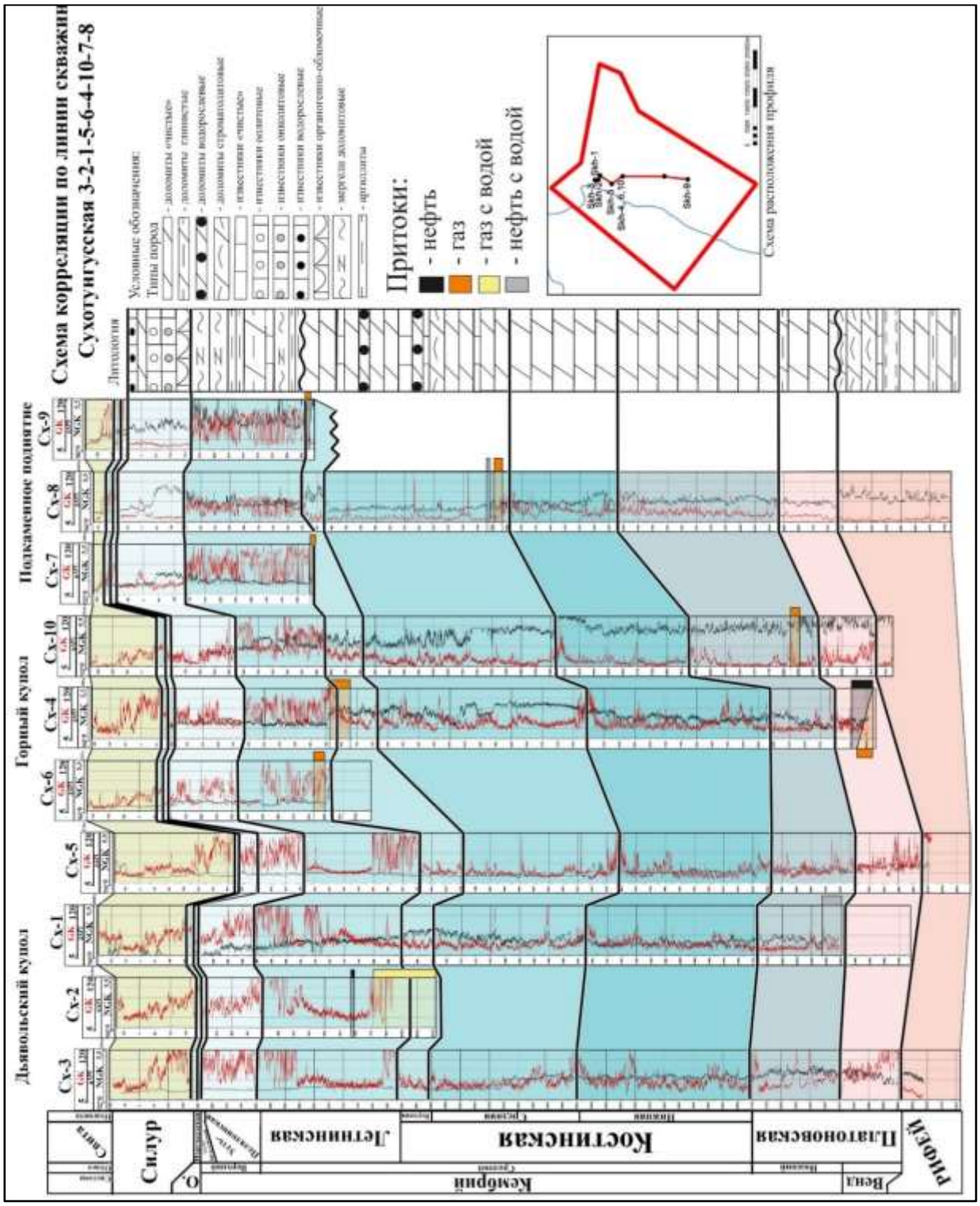


Рисунок 2. Межскважинная корреляция продуктивного интервала Сухотунгусского вала с выделением кровли костинской свиты и основных коллекторских интервалов.

С практической точки зрения это означает, что прогноз перспективности не может основываться только на положении участка в сводовой части структуры. В карбонатных резервуарах такого типа структурное замыкание

является необходимым, но недостаточным условием формирования ловушки. При отсутствии развитой вторичной ёмкости даже благоприятное структурное положение может не обеспечивать эффективной аккумуляции углеводородов. Напротив, локальные зоны трещиноватости и кавернозности в пределах структурных поднятий могут создавать наиболее благоприятные условия для аккумуляции углеводородов.

Верхнекостинский резервуар следует рассматривать как неоднородную систему локальных коллекторских тел, пространственно связанных с зонами тектонической переработки и вторичного преобразования карбонатных пород. Такой тип строения обусловливает высокую неопределённость при межскважинной корреляции и требует аккуратного использования как скважинной, так и сейсмической информации.

Роль структурно-тектонического фактора

По результатам проведённых исследований Сухотунгусский вал интерпретируется как складчато-надвиговая структура рампового типа, сформированная в условиях поздних внутриплатформенных деформаций западной окраины Сибирской платформы. Основные локальные структуры – Подкаменное поднятие, Горный и Дьявольский купола – контролируют развитие структурных и структурно-тектонических ловушек углеводородов.

Структурно-тектонический фактор проявляется в нескольких аспектах. Во-первых, локальные поднятия формируют участки структурного замыкания, потенциально благоприятные для аккумуляции углеводородов. Во-вторых, тектонические нарушения могут выступать как экранирующие элементы, обеспечивающие сохранность локальных залежей. В-третьих, зоны тектонической переработки могут способствовать формированию вторичной трещиноватости и повышению фильтрационно-ёмкостных свойств карбонатных пород.

Однако роль разломов и тектонических нарушений является неоднозначной. С одной стороны, они могут контролировать миграцию флюидов и развитие вторичного коллекторского пространства. С другой стороны, поздняя тектоническая активизация может приводить к нарушению ранее сформированных ловушек, перераспределению флюидов и частичной деградации залежей. Поэтому при оценке перспективности верхнекостинского резервуара необходимо учитывать не только наличие структурного замыкания, но и степень тектонической переработки, характер экранирования и сохранность ловушки.

Факторы локализации перспективных ловушек

Локализация перспективных ловушек верхнекостинского резервуара определяется сочетанием нескольких факторов. Первостепенное значение имеет структурное положение: наиболее благоприятные условия для аккумуляции углеводородов формируются в пределах локальных поднятий,

където възможно образование структурных замыканий. В пределах Сухотунгусского вала к таким объектам относятся Подкаменное поднятие, Горный и Дьявольский купола. Однако само по себе структурное замыкание не является достаточным условием продуктивности.

Для верхнекостинского резервуара ключевое значение имеет развитие вторичной ёмкости, представленной трещинно-кавернозными коллекторами. Формирование такого пустотного пространства связано с доломитизацией, трещинообразованием, кавернозностью и неравномерным вторичным преобразованием карбонатных пород. Дополнительную роль играет тектоническая переработка разреза: зоны нарушенности могут повышать коллекторские свойства за счёт трещинообразования, но при интенсивной поздней активизации способны ухудшать условия сохранности залежей.

Пространственное положение предполагаемых ловушек углеводородов отражает связь перспективных зон с локальными купольными поднятиями и участками тектонического осложнения разреза (рис. 3).

Существенное значение имеют также условия экранирования и сохранности нефтегазовой системы. Для исследуемого объекта более вероятна не единая региональная залежь, а система локальных структурных и структурно-тектонических ловушек. Перспективными следует считать участки, где совпадают несколько условий: наличие локального структурного поднятия, развитие вторичного трещинно-кавернозного коллектора, наличие экранирующих элементов и относительная сохранность ловушки после поздних тектоно-магматических событий.

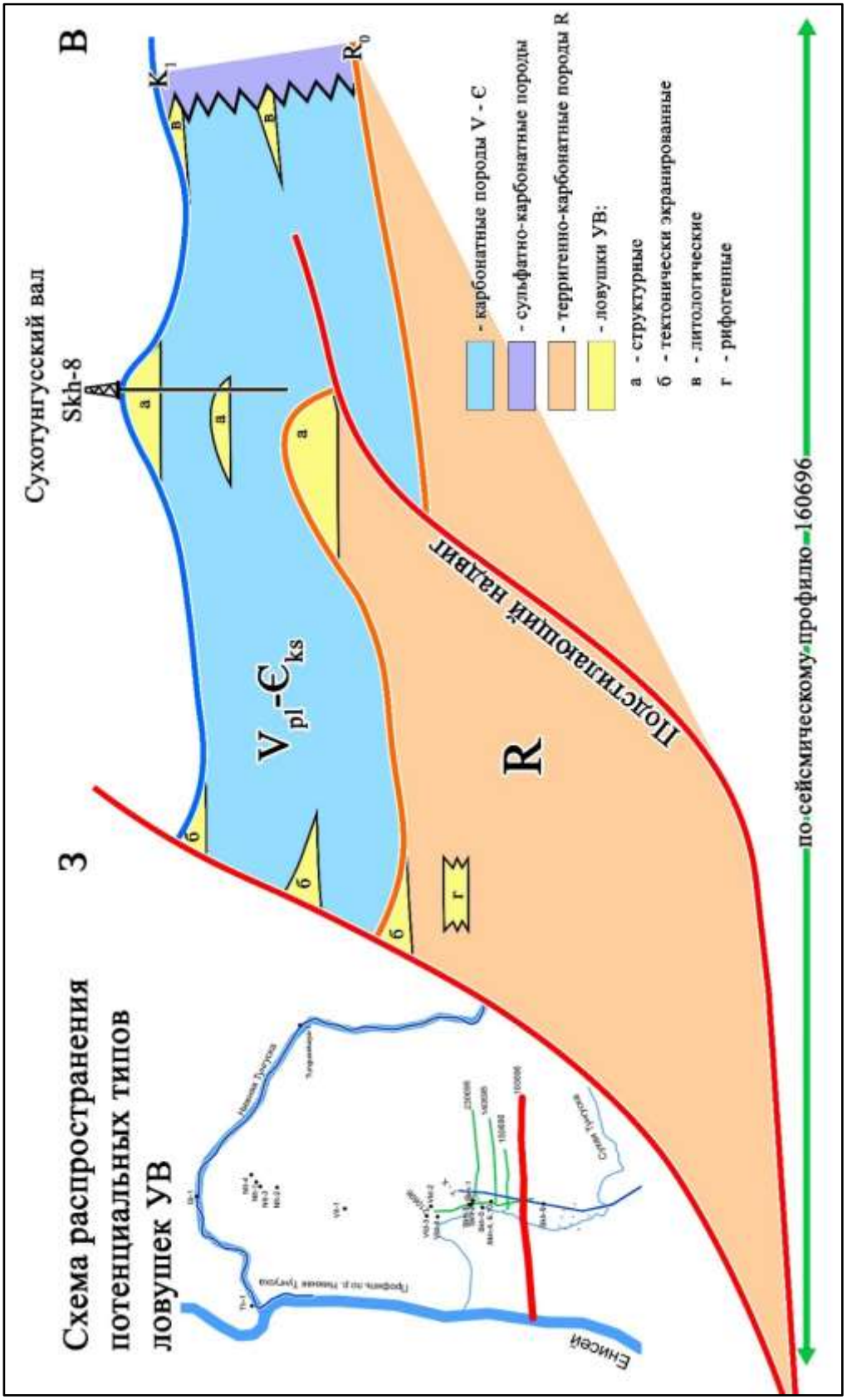


Рисунок 3. Схема распространения потенциальных ловушек углеводородов в пределах Сухотунгусского вала.

Значение интегрированного 3D геологического моделирования

В условиях ограниченной плотности бурения и разреженной сети сейсмических профилей оценка строения верхнекостинского резервуара только по отдельным скважинам является недостаточной. Распределение коллекторов в карбонатных толщах имеет мозаичный характер, а фильтрационно-ёмкостные свойства в значительной степени контролируются вторичными процессами – трещиноватостью, кавернозностью, доломитизацией и локальной тектонической переработкой пород. Поэтому для прогноза перспективных зон необходимо совместное использование данных бурения, ГИС, испытаний, сейсмической интерпретации и структурных построений.

Интегрированная 3D геологическая модель в данном случае рассматривается не как инструмент детального подсчёта запасов, а как способ согласования разнородных геолого-геофизических данных и проверки геологической концепции строения резервуара. Такая модель позволяет сопоставить положение локальных поднятий, структурных замыканий, зон развития коллекторов и участков нефтегазопроявлений в едином пространственном каркасе. Это особенно важно для верхнекостинского резервуара, где продуктивность определяется не только положением в сводовой части структуры, но и наличием вторичной трещинно-кавернозной ёмкости.

Результаты моделирования подтверждают, что перспективные зоны верхнекостинского резервуара не образуют единого выдержанного коллекторского тела. Они имеют локальный характер и связаны с участками, где благоприятное структурное положение сочетается с развитием вторичного коллектора и условиями экранирования. В связи с этим Сухотунгусский вал целесообразно рассматривать как систему локальных структурных и структурно-тектонических ловушек, а не как единую региональную залежь.

Фрагмент 3D-модели позволяет визуализировать мозаичный характер распространения коллекторов и сопоставить его с положением локальных структур Сухотунгусского вала (рис. 4).

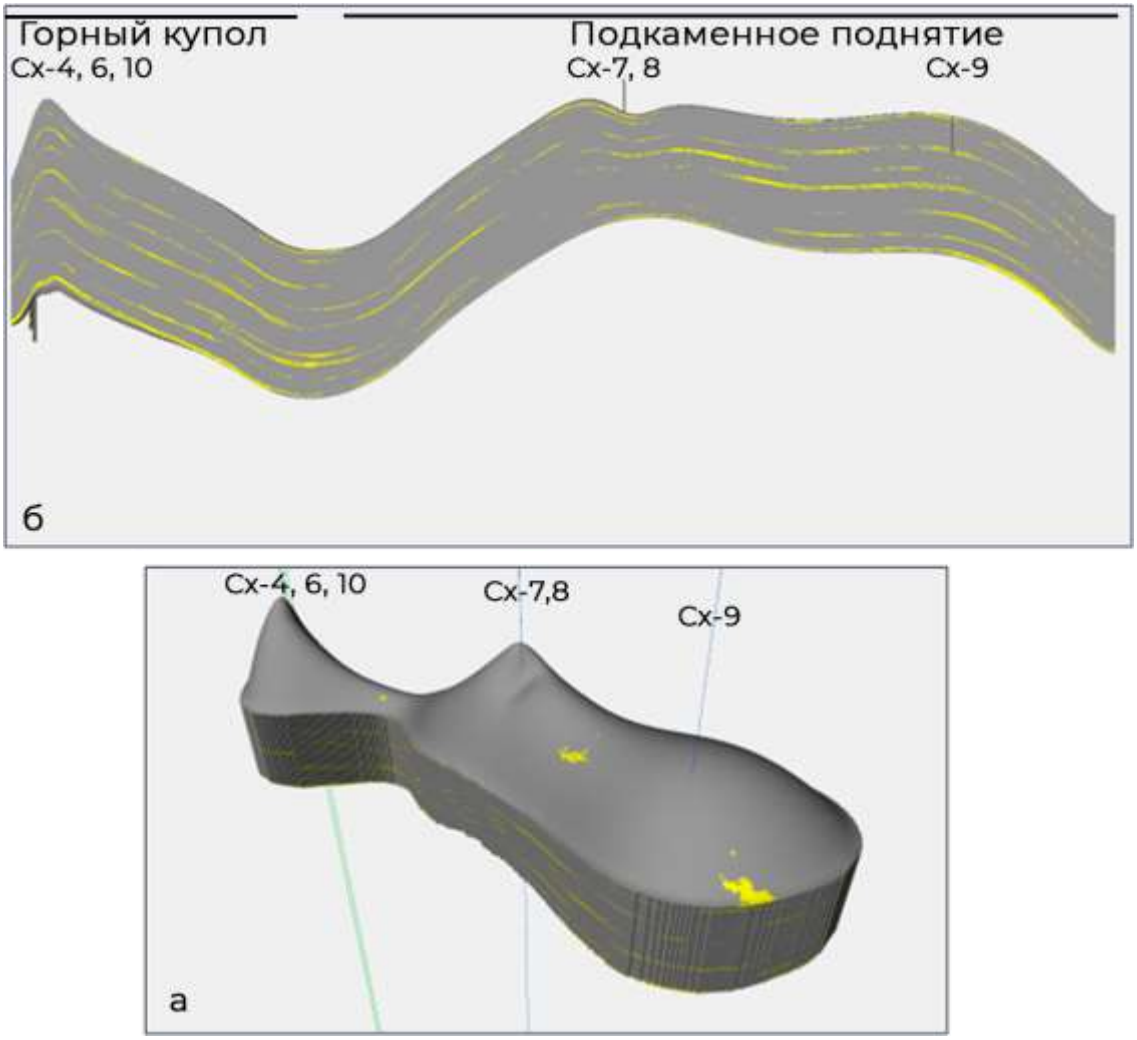


Рисунок 4. Фрагмент 3D-модели верхнекостинского резервуара: распределение коллекторов в пределах локальных структур Сухотунгусского вала.

Заключение

Верхнекостинский резервуар Сухотунгусского вала представляет собой сложнопостроенный карбонатный объект, характеризующийся высокой латеральной неоднородностью и мозаичным развитием вторичных коллекторов трещинно-кавернозного типа.

Формирование фильтрационно-ёмкостных свойств верхнекостинского резервуара связано преимущественно с процессами трещинообразования, кавернозности, доломитизации и вторичной тектонической переработки карбонатных пород. В связи с этим перспективность отдельных участков определяется не только структурным положением, но и степенью развития вторичного коллекторского пространства.

Основные локальные структуры Сухотунгусского вала – Подкаменное поднятие, Горный и Дьявольский купола – контролируют развитие преимущественно структурных и структурно-тектонических ловушек

углеводородов. Наиболее перспективные зоны коллекторов приурочены к локальным участкам разуплотнения в пределах купольных поднятий.

Нефтегазоносность Сухотунгусского вала, по результатам комплексной интерпретации, связана не с единой региональной залежью, а с системой локальных тектонически экранированных резервуаров. Для верхней части костинской свиты наиболее характерны локальные газонасыщенные ловушки, приуроченные к структурным замыканиям Подкаменного поднятия и Горного купола.

Применение интегрированного 3D геологического моделирования является необходимым условием для корректного прогноза перспективных ловушек в сложнопостроенных карбонатных резервуарах. Такой подход позволяет объединить данные бурения, ГИС, испытаний, сейсморазведки и структурных построений, а также уточнить пространственное положение наиболее перспективных зон.

Список литературы:

1. Анциферов А.С., Бакин В.Е., Варламов И.П. Геология нефти и газа Сибирской платформы / под ред. А. Э. Конторовича, В. С. Суркова, А. А. Трофимука. – Москва: Недра, 1981. – 552 с.
2. Баженова Т.К., Казаис В.И. История нефтегазообразования и нефтегазонакопления на северо-западе Сибирской платформы (историко-геохимический и структурно-исторический анализ) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2011. – Т. 6, № 2. – 10 с. EDN: OYQFKP
3. Бакай Е. А. Нефтематеринские рифей-кембрийские отложения Туруханского поднятия (Восточная Сибирь): дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.12. – Москва, 2012. – 142 с. EDN: QFVCIH
4. Белонин М. Д., Самсонов В. В. Роль битумоидных аномалий в формировании нефтяных ресурсов Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45, № 1. – С. 127–133. EDN: QYYVIB
5. Фомин А. М., Моисеев С. А. Перспективы нефтегазоносности и характеристика продуктивных горизонтов кембрийских межсолевых отложений центральной части Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2019. – Т. 14, № 3. – С. 1-16.
6. Конторович А.Э., Мельников Н.В., Старосельцев В.С. Нефтегазоносные провинции и области Сибирской платформы // Геология и нефтегазоносность Сибирской платформы. Труды СНИИГГиМС. – 1975. – № 222. – С. 4-21.
7. Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К. и др. Геология нефти и газа Сибирской платформы // Москва: Недра, 1975. – 680 с.

UDC 004.89:811.411.21

Zoalfkar Ali Deeb
Scientific supervisor: Bessmertny I. A., D.Sc. (Tech.), Professor
ITMO University, Saint Petersburg, Russia

TOWARDS HIGH-QUALITY ARABIC KNOWLEDGE GRAPHS: IMPROVING ENTITY AND RELATION EXTRACTION PERFORMANCE

Abstract. Constructing knowledge graphs in Arabic is one of the most challenging tasks in modern natural language processing due to the morphological richness of the Arabic language, the variability of entity spellings, and the limited availability of annotated corpora. This article examines modern methods for extracting entities and relations as key components of the automatic construction of Arabic knowledge graphs. We analyze recent research in the field of Arabic Named Entity Recognition (NER) and Relation Extraction (RE), based on transformer architectures and large-scale language models. We propose a comprehensive approach to improving the quality of Arabic knowledge graphs through joint entity and relation extraction, entity normalization, and the use of domain-adapted language models. The results of the analysis demonstrate that the integration of modern deep learning methods and entity resolution mechanisms can significantly improve the completeness and reliability of extracted knowledge.

Keywords: Arabic NLP, knowledge graph, named entity recognition, relation extraction, transformer models, information extraction.

Knowledge Graphs (KGs) have become one of the most important paradigms for representing structured knowledge in intelligent information systems. They provide machine-readable representations of entities and relationships, enabling semantic search, question answering, recommendation systems, and decision support applications [1]. In recent years, the rapid growth of Arabic digital content has created a strong demand for high-quality Arabic knowledge graphs capable of organizing and exploiting large volumes of unstructured textual data [2].

Despite significant progress in knowledge graph construction for English and several high-resource languages, Arabic remains relatively underexplored. Arabic presents unique linguistic challenges, including rich morphology, complex word formation, orthographic ambiguity, dialectal diversity, and inconsistent use of diacritics [3]. These characteristics significantly complicate information extraction tasks and reduce the effectiveness of traditional approaches developed for other languages.

The quality of a knowledge graph largely depends on two fundamental tasks: Named Entity Recognition (NER) and Relation Extraction (RE). NER identifies mentions of real-world entities such as persons, organizations, locations, and events, while RE determines semantic relationships between these entities [4]. Errors in

either task propagate through the knowledge graph construction pipeline and negatively affect graph completeness, consistency, and usability.

Recent advances in transformer-based language models, including ArabicBERT, AraBERT, AraELECTRA, MARBERT, and multilingual large language models, have significantly improved Arabic information extraction performance [3, 5]. At the same time, new research demonstrates that entity resolution, relation normalization, and joint extraction architectures can further improve graph quality by reducing redundancy and ambiguity [6].

This study analyses current approaches to Arabic entity and relation extraction and proposes methodological directions for constructing higher-quality Arabic knowledge graphs.

Arabic knowledge graph construction faces several challenges that are less prominent in English-language systems.

First, Arabic morphology is highly productive. A single root can generate numerous lexical forms through prefixes, suffixes, and infixes. Consequently, identical entities may appear in multiple surface forms, complicating entity recognition and linking [3].

Second, Arabic texts frequently omit diacritics. This omission introduces lexical ambiguity because multiple words may share the same spelling while having different meanings. Such ambiguity negatively affects both NER and RE systems [7].

Third, named entities often exhibit orthographic variation. For example, personal and organizational names may be written differently across documents, leading to duplicate nodes within a knowledge graph. Without effective entity resolution mechanisms, graph fragmentation becomes inevitable [6].

Fourth, Arabic datasets remain relatively limited compared to English resources. Although initiatives such as WojoodNER have substantially expanded Arabic NER benchmarks, data scarcity remains a major obstacle for robust model training [8].

Finally, Arabic content frequently combines Modern Standard Arabic with regional dialects. Models trained solely on standard language corpora often demonstrate reduced performance when applied to real-world social media or domain-specific texts [3].

Named Entity Recognition constitutes the first stage of most knowledge graph construction pipelines. Recent surveys indicate that transformer-based architectures have become the dominant approach for Arabic NER, significantly outperforming traditional machine learning and rule-based methods [3].

The emergence of large-scale Arabic language models has transformed the field. Contextual embeddings generated by transformer models capture semantic and morphological information more effectively than conventional word embeddings.

As a result, recent Arabic NER systems achieve F1 scores exceeding 90% on benchmark datasets [8].

The WojoodNER 2023 shared task demonstrated the effectiveness of transformer-based architectures in both flat and nested entity recognition. The best-performing systems achieved F1 scores above 91% for flat NER and 93% for nested NER, establishing new state-of-the-art results for Arabic entity extraction [8].

Another important trend involves domain adaptation. Researchers increasingly fine-tune pretrained models on domain-specific corpora such as healthcare, finance, and legal documents. Domain adaptation improves recognition accuracy by incorporating specialized vocabulary and contextual patterns absent from general-purpose datasets [5].

Recent studies also emphasize fine-grained entity recognition. Instead of categorizing entities into broad classes such as Person or Organization, modern systems identify more specific semantic categories, thereby enriching knowledge graph semantics and supporting more sophisticated reasoning tasks [3].

While entity recognition has received substantial attention, relation extraction remains comparatively underdeveloped in Arabic NLP. Nevertheless, RE is essential because knowledge graphs derive their value from meaningful connections among entities.

Traditional pipeline architectures perform NER and RE sequentially. However, such approaches suffer from error propagation. Incorrect entity boundaries inevitably lead to incorrect relation predictions [9].

Recent research favors joint extraction models that simultaneously identify entities and relationships within a unified architecture [10]. Joint models exploit mutual dependencies between tasks and generally outperform pipeline-based approaches.

Transformer-based RE systems have demonstrated considerable improvements in Arabic information extraction. Models based on multilingual BERT and GigaBERT achieve strong performance across multiple Arabic relation extraction benchmarks [11]. These architectures effectively capture contextual dependencies and long-range semantic relationships.

Large language models have further expanded opportunities for relation extraction. Recent studies indicate that prompt-based extraction methods can discover previously unseen relations and improve knowledge graph coverage without requiring extensive manual annotation [12].

Moreover, retrieval-augmented approaches are increasingly applied to low-resource languages. By incorporating external contextual information during extraction, these systems improve both relation accuracy and graph completeness [13].

Achieving high-quality Arabic knowledge graphs requires improvements beyond isolated NER and RE tasks.

A critical component is entity resolution. Different textual mentions referring to the same real-world entity must be identified and merged. Recent graph construction frameworks demonstrate that entity clustering significantly reduces graph sparsity and redundancy while increasing information density [6].

Another important factor is relation normalization. Extracted relations frequently appear in numerous lexical forms. Mapping semantically equivalent relations to canonical representations improves graph consistency and facilitates downstream reasoning [12].

Joint entity-relation extraction architectures also contribute to quality enhancement. By learning entities and relations simultaneously, these systems reduce cascading errors and improve overall extraction accuracy [10].

Data augmentation represents another promising direction. Synthetic training examples generated through language models can alleviate data scarcity and improve model robustness in low-resource settings [3].

Finally, ontology-guided extraction methods can provide semantic constraints during graph construction. Domain ontologies help validate extracted triples and reduce inconsistencies, thereby increasing graph reliability [14].

Several promising directions may further improve Arabic knowledge graph construction.

The first involves integrating large language models with symbolic knowledge representations. Such hybrid systems combine the reasoning capabilities of knowledge graphs with the linguistic understanding of foundation models [6].

The second concerns multilingual transfer learning. Arabic can benefit from knowledge acquired from higher-resource languages through cross-lingual alignment and multilingual representation learning [13].

Third, future systems should address dialectal Arabic more comprehensively. Since large portions of online Arabic content are dialectal, robust graph construction frameworks must support linguistic variation beyond Modern Standard Arabic [3].

Fourth, graph quality evaluation requires greater attention. Existing benchmarks primarily measure NER and RE performance but rarely assess graph coherence, completeness, and semantic consistency. New evaluation frameworks should capture these broader quality dimensions [6].

Finally, explainable extraction systems may improve trust and adoption in critical domains such as healthcare, law, and government services. Transparent reasoning mechanisms will become increasingly important as knowledge graphs support high-stakes decision-making.

Arabic knowledge graph construction has experienced significant progress due to advances in transformer-based language models, large-scale datasets, and neural information extraction methods. Nevertheless, challenges associated with Arabic morphology, orthographic ambiguity, dialectal variation, and limited resources continue to hinder the development of high-quality knowledge graphs.

Current evidence suggests that improvements in entity recognition alone are insufficient. High-quality Arabic knowledge graphs require integrated solutions that combine robust NER, accurate relation extraction, entity resolution, relation normalization, and ontology-guided validation. Joint extraction architectures and large language models offer particularly promising opportunities for enhancing graph quality.

Future research should focus on multilingual transfer, retrieval-augmented extraction, graph-level quality assessment, and the integration of symbolic and neural approaches. These developments are expected to enable more accurate, comprehensive, and semantically rich Arabic knowledge graphs capable of supporting next-generation intelligent systems.

References:

1. D'Souza J., Mihindukulasooriya N. The State of the Art on Knowledge Graph Construction from Text: Named Entity Recognition and Relation Extraction Perspectives / J. D'Souza, N. Mihindukulasooriya // The Knowledge Graph Conference, 2022. DOI:10.5281/zenodo.6521656

2. Ahmed I.A., Al-Aswadi F.N., Noaman Kh.M.G., Alma'Aitah W.Z. Arabic Knowledge Graph Construction: A Close Look in the Present and into the Future // Journal of King Saud University. Computer and Information Sciences. – 2022. – Vol. 34, No. 9. – P. 6505–6523. DOI: 10.1016/j.jksuci.2022.04.007 EDN: DLMWPU

3. Qu X., Gu Y., Xia Q. A Survey on Arabic Named Entity Recognition: Past, Recent Advances, and Future Trends / X. Qu, Y. Gu, Q. Xia [et al.] // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2024. – Vol. 36, No. 3. – P. 943–959. DOI: 10.1109/TKDE.2023.3303136 EDN: QSLVXE

4. Bakker R. M. From Text to Knowledge Graph: Comparing Relation Extraction Methods in a Practical Context / R. M. Bakker, D. L. Di Scala // GeNeSy 2024: Generating Next-Generation Intelligent Systems: proceedings of the 1st Workshop on Generating Next-Generation Intelligent Systems co-located with the 21st Extended Semantic Web Conference (ESWC 2024), Heraklion, Greece, May 26–30, 2024. – Aachen: CEUR-WS.org, 2024. – P. 34–45.

5. Moussaoui T. El. Advancements in Arabic Named Entity Recognition: A Comprehensive Review / T. El Moussaoui, CH. Loqman // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 180238–180266. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3492723 EDN: MMVVZZ

6. Mo B. Extracting Knowledge Graphs from Plain Text with Language Models / B. Mo, K. Yu, J. Kazdan [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems 38 (NeurIPS 2025): 39th Conference on Neural Information Processing Systems, December 2025.

7. Muhammed M. Evaluating Transformer-Based Pretrained Models for Classical Arabic Named Entity Recognition / M. Muhammed, SH. Azab // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2025. – Vol. 16, No. 10. DOI: 10.14569/ijacsa.2025.0161019 EDN: HXUUBG

8. Jarrar M. WojoodNER 2023: The First Arabic Named Entity Recognition Shared Task / M. Jarrar, M. Abdul-Mageed, M. Khalilia [et al.] // In Proceedings of the First Arabic Natural Language Processing Conference (ArabicNLP 2023). – Singapore: Association for Computational Linguistics, 2023. – P. 748–758. DOI: 10.18653/v1/2023.arabicnlp-1.83

9. Harnoune A. BERT Based Clinical Knowledge Extraction for Biomedical Knowledge Graph Construction and Analysis / A. Harnoune, M. Rhanoui, M. Mikram [et al.] //

Computer methods and programs in biomedicine update. – 2021. – Vol. 1. – 100042 p. DOI: 10.1016/j.cmpbup.2021.100042 EDN: QQRHZS

10. Xue YA. Construction and Application of Text Entity Relation Joint Extraction Model Based on Multi-Head Attention Neural Network / YA. Xue, J. Zhu, J. Lyu // Computational Intelligence and Neuroscience. – 2022. – Vol. 2022. – 1530295 p. DOI: 10.1155/2022/1530295 EDN: XOHSCB

11. Lan W. An Empirical Study of Pre-trained Transformers for Arabic Information Extraction / W. Lan, Y. Chen, W. Xu, A. Ritter // Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP 2020). – Stroudsburg (PA): Association for Computational Linguistics, 2020. – P. 4727–4734. DOI: 10.18653/v1/2020.emnlp-main.382

12. Hao S. BertNet: Harvesting Knowledge Graphs with Arbitrary Relations from Pretrained Language Models / S. Hao, B. Tan, K. Tang [et al.] // Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL 2023. – Toronto: Association for Computational Linguistics, 2023. – P. 5000–5015. DOI: 10.18653/v1/2023.findings-acl.309

13. Nigatu H. H. mRAKL: Multilingual Retrieval-Augmented Knowledge Graph Construction for Low-Resourced Languages / H. H. Nigatu, M. Li, M. Ter Hoeve [et al.] // Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL 2025. – Vienna: Association for Computational Linguistics, 2025. – P. 13072–13089. DOI: 10.18653/v1/2025.findings-acl.678

14. Mouiche I. Context-aware Entity-Relation Extraction for Threat Intelligence Knowledge Graphs / I. Mouiche, H. Merbou, S. Saad. – TechRxiv. – 2025. DOI: 10.36227/techrxiv.173627493.39916970/v1

УДК 624.15:629.73(571.54)

Киорогло М. А., Кошкин А. К.
Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ФУНДАМЕНТОВ АЭРОПОРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ Г. УЛАН-УДЭ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ НАГРУЗОК ОТ НОВЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы оценки несущей способности фундаментов аэропортовых сооружений г. Улан-Удэ в условиях возрастающих эксплуатационных нагрузок, обусловленных введением в эксплуатацию новых типов воздушных судов В связи с этим группой студентов-архитекторов выполнен анализ инженерно-геологических и климатических особенностей района расположения аэропорта Мухино, рассмотрены методы обследования и расчёта несущей способности фундаментов, а также предложены технологии их усиления. Полученные результаты исследования могут быть востребованы при реализации программ модернизации аэродромной инфраструктуры в сейсмически активных регионах с резко континентальным климатом.

Ключевые слова: аэропортовые сооружения, фундаменты, несущая способность, обследование, усиление, Улан-Удэ, сейсмичность, вечная мерзлота.

Введение

В последние десятилетия развитие авиационной отрасли и обновление парка воздушных судов в Российской Федерации предъявляет повышенные требования к аэродромной инфраструктуре. Особую актуальность данная проблема приобретает в регионах со сложными природно-климатическими условиями, к которым относится Республика Бурятия.

Аэропорт Мухино (г. Улан-Удэ) – ключевой транспортный узел Забайкалья, фундаменты сооружений которого возводились в соответствии со строительными нормами и фактическими нагрузками прошлых десятилетий [2]. Но в настоящее время расчётный ресурс ряда конструктивных элементов приближается к нормативному пределу, что в сочетании с высокой сейсмичностью создаёт предпосылки для снижения несущей способности оснований.

Таким образом, целью нашей работы является комплексная оценка несущей способности существующих фундаментов аэропортовых сооружений г. Улан-Удэ и разработка рекомендаций по их усилению с учётом прогнозируемого роста нагрузок. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи исследования: анализ инженерно-геологических и климатических особенностей площадки; оценка технического состояния фундаментов; расчёт несущей способности по действующим нормам

[3, 4]; обоснование технологий усиления и разработка концепции нового терминального комплекса.

1. Характеристика объекта исследования

Прежде всего, необходимо дать общую характеристику объекта. Аэропорт Мухино расположен приблизительно в 15 км к юго-западу от центра Улан-Удэ и является единственным гражданским аэропортом республиканского значения. Инфраструктура, в свою очередь, включает: взлётно-посадочную полосу длиной около 3 500 м; разветвлённую сеть рулёжных дорожек; перрон для стоянки и технического обслуживания воздушных судов;

Рисунок 1 – Здание аэропорта Мухино г. Улан-Удэ

Что касается конструктивных особенностей, при строительстве объектов аэропорта применялись два основных типа фундаментных конструкций. Под зданиями терминала и ангаров устроены монолитные железобетонные фундаменты – ленточные и плитные, обеспечивающие равномерное распределение нагрузки на основание. Под перроном и рулёжными дорожками, в свою очередь, применены сборные железобетонные плиты, уложенные на уплотнённое песчано-гравийное основание с дренирующей подушкой [5]. Следует отметить, что нагрузки от сооружений передаются на естественное основание, представленное песчано-гравийными грунтами аллювиального происхождения с прослоями суглинков; несущие слои залегают на глубине 2,0–3,5 м от поверхности.

Рисунок 2 – Взлетно-посадочная полоса и терминал аэропорта Мухино г. Улан-Удэ

2. Инженерно-геологические и климатические особенности площадки

Переходя к анализу природных условий, необходимо подчеркнуть, что территория аэропорта приурочена к надпойменной террасе реки Уды. Геологический разрез площадки характеризуется следующим строением: верхний слой – насыпные грунты мощностью 0,3–0,8 м; ниже – аллювиальные пески средней крупности.

Наряду с геологическими особенностями, долгосрочную эксплуатацию сооружений существенно осложняет ряд специфических природно-климатических факторов:

– резко континентальный климат с экстремальными перепадами температур (от −38 °C зимой до +35 °C летом), обусловливающий значительные температурные деформации конструкций;

– нормативная глубина сезонного промерзания грунтов: для суглинков – 2,07 м, для песков средней крупности – 2,70 м (согласно СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» [4]);

– повышенная сейсмичность: согласно данным сейсмического микрорайонирования г. Улан-Удэ, расчётная интенсивность для средних грунтовых условий составляет 8 баллов по шкале MSK-64 [7];

– участки с повышенным уровнем грунтовых вод в пределах надпойменной террасы, требующие устройства эффективных дренажных систем.

Совокупность перечисленных факторов предопределяет повышенные требования к надёжности фундаментов и обусловливает необходимость их детального обследования.

3. Методика оценки несущей способности фундаментов

Для обеспечения достоверности результатов оценка несущей способности фундаментов проводится в соответствии с требованиями СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» [3] и СП 50-101-2004 [8]. Работы выполняются в следующей последовательности:

1. изучение проектной документации, архивных материалов по строительству и паспортов объектов;
2. натурное обследование фундаментов;
3. дополнительные инженерно-геологические изыскания согласно СП 47.13330.2016 [2]: проходка скважин, отбор образцов грунта, лабораторное определение характеристик φ, c, E; полевые испытания штампом;
4. расчёт несущей способности по предельным состояниям первой группы с учётом сейсмических воздействий;
5. финальное сопоставление расчётных и фактических нагрузок с учётом коэффициентов надёжности и сейсмических поправок.

В основе расчётной модели лежит формула теории предельного равновесия, позволяющая определить расчётное сопротивление грунта R [3, 5]:

$$R = c \cdot Nc + q \cdot Nq + 0{,}5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N\gamma,$$

где: R – расчётное сопротивление грунта, кПа; c – удельное сцепление грунта, кПа; q – вертикальное напряжение от собственного веса грунта на уровне подошвы фундамента, кПа; γ – удельный вес грунта ниже подошвы фундамента, кН/м³; B – ширина подошвы фундамента, м; Nc, Nq, Nγ – безразмерные коэффициенты несущей способности, определяемые в зависимости от угла внутреннего трения φ.

4. Результаты расчёта несущей способности

По данным натурного обследования фундамента терминального здания аэропорта получены следующие характеристики [9]:

– фактическое давление на основание: p = 195 кПа;
– проектное значение: pпроект = 170 кПа;
– расчётное сопротивление грунта на глубине 2,5 м: R = 210–230 кПа.

Анализ полученных данных показывает, что фактическое давление превышает проектное на 14,7 %, что свидетельствует о минимальном запасе несущей способности (R − p = 15–35 кПа). Более того, с учётом сейсмических воздействий интенсивностью 8 баллов и прогнозируемого роста нагрузок от воздушных судов нового поколения (SSJ-New, МС-21) данный запас признаётся недостаточным [7]. Следовательно, возникает необходимость комплексного усиления оснований.

5. Методы повышения несущей способности фундаментов

Исходя из инженерно-геологических особенностей площадки, суровых климатических условий и высокой сейсмичности района, наиболее эффективными признаются следующие технологии [5, 6]:

– **Инъекционное упрочнение грунтов** – цементация (состав Ц:В = 1:1–1:2, давление 0,3–0,6 МПа) и силикатизация (двухрастворный метод для песков с k*f* = 0,5–20 м/сут) – позволяют существенно повысить прочностные и деформационные характеристики основания;

– **буроинъекционные сваи** (d = 150–250 мм, L = 8–14 м, бетон R*сж* ≥ 35 МПа, армирование сварными каркасами) обеспечивают передачу нагрузок на несущие слои ниже зоны сезонного промерзания;

– **усиление железобетонными обоймами и ростверками** (толщина 150–300 мм, сетки ∅12 А500С с шагом 200×200 мм, сульфатостойкий бетон класса В30, морозостойкость F300) повышает жёсткость и несущую способность существующих конструкций;

– **устройство дренажных систем** – кольцевой дренаж с фильтрующей обсыпкой из гравия фракции 5–20 мм и насосные станции для

принудительного водоотлива в период снеготаяния – исключает негативное влияние грунтовых вод;

– **геотехнический мониторинг деформаций** – нивелирование осадочных марок (точность ±1 мм), измерение кренов оптическими теодолитами и инклинометрами, автоматизированные системы с датчиками давления и температуры грунта – позволяет своевременно выявлять негативные изменения в состоянии оснований.

Важно подчеркнуть, что только комплексное применение перечисленных методов, а не отдельных из них, способно обеспечить долговременную надёжность фундаментов в условиях Забайкалья.

6. Концепция нового терминального комплекса

Опираясь на результаты проведённого анализа, предлагается строительство нового терминального комплекса площадью 14 000 м², призванного стать архитектурным символом Бурятии и транспортным хабом Байкальского региона.

Пятиуровневая структура здания (включая подземный уровень) обеспечивает чёткое функциональное зонирование: подземный уровень – автоматизированный перехватывающий паркинг (350 мест) и технические помещения; первый этаж – зона прибытия, выдача багажа, таможенный и пограничный контроль; второй этаж – зона регистрации и вылета, досмотровые зоны, бизнес-зал; третий этаж – панорамные рестораны, смотровая галерея; кровля – солнечная электростанция мощностью 300 кВт, вертолётная площадка санитарной авиации.

С точки зрения конструктивных решений, несущий каркас здания включает предварительно напряжённые железобетонные колонны, стальные пространственные фермы для перекрытия пролётов до 50 м и лёгкие сэндвич-панели на основе углеволоконных композитов. В свою очередь, фундаменты – комбинированные плитно-свайные с сейсмозащитными резинометаллическими изоляторами, рассчитанными на воздействия 8 баллов MSK-64 [7] и обеспечивающими стабильность в условиях неравномерной осадки.

Помимо этого, инженерные системы обеспечивают высокую энергоэффективность в условиях резко континентального климата: геотермальные тепловые насосы, система рекуперации тепловой энергии, биометрический контроль доступа, роботизированная система обработки багажа. В итоге ожидаемые эффекты составят: снижение энергопотребления на 45 %, сокращение эксплуатационных расходов на 28 %, увеличение пассажиропотока на 35 % в первые пять лет эксплуатации.

Заключение

Проведённое исследование позволяет сделать вывод о том, что существующие фундаменты аэропортовых сооружений г. Улан-Удэ в целом

соответствуют нормативным требованиям по несущей способности, однако располагают весьма ограниченным запасом прочности. Учитывая прогнозируемый рост нагрузок и сложные природные условия района, реализация предложенного комплекса мероприятий позволит:

– повысить расчётное сопротивление грунта на 35–55 %;

– минимизировать неравномерные осадки фундаментов в условиях сезонного промерзания и оттаивания;

– обеспечить сейсмостойкость сооружений при расчётных воздействиях 8 баллов;

– продлить нормативный срок службы конструкций без капитальной реконструкции на 20–25 лет.

Только совокупность данных мер способна обеспечить надёжную и долговечную эксплуатацию аэропортовой инфраструктуры в сложных условиях Забайкалья. В конечном счёте, предложенные инженерные решения могут быть использованы при реконструкции аэродромной инфраструктуры других аэропортов Сибири и Дальнего Востока, находящихся в сопоставимых природно-климатических условиях.

Список литературы:

1. Сабуренкова В.А., Цаплин Я.Н. Исследование расчетных нагрузок на аэродромные покрытия // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2021. – № 2 (96). – С. 10–12. EDN: KZQHQA

2. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. – М.: Минстрой России, 2016. – 123 с.

3. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. – М.: Минстрой России, 2016. – 297 с.

4. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. – М.: Минстрой России, 2020. – 124 с.

5. Бойко М.Д., Дутов Б.П., Ермилов В.И. Аэродромные сооружения / М. Д. Бойко, Б. П. Дутов, В. И. Ермилов и др.; под общ. ред. М. А. Курышева // Ленинград: ЛКВВИА им. А. Ф. Можайского, 1959. – 474 с.

6. Трофимов В.Т. Инженерная геология // МГУ, 2023. – 576 с.

7. Dzhurik V.I., Tubanov TS.A. [et. al]. An overview of the technique for seismicity microzonation mapping of the Ulan-Ude city territory // Geodynamics & tectonophysics. – 2015. – Vol. 6, No. 3. – P. 365–386. DOI: 10.5800/GT?2015?6?3?0186 EDN: UJIPBL

8. СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. – М.: Госстрой России, 2004. – 248 с.

9. Приказ Росавиации от 28.07.2023 n 595-п (начало) «Об установлении приаэродромной территории аэродрома гражданской авиации Улан-Удэ (Мухино)» // Министерство Юстиции РФ.

10. Шашкин А.Г. Проектирование зданий и подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга / А. Г. Шашкин. – Москва: Геомаркетинг, 2014. – 350, [1] с.

УДК 004.413.5

Анищенко А. А., Калицкий А. В., Колос С. А.
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ВЛИЯНИЕ РАЗВИТИЯ ИГРОВЫХ ДВИЖКОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ВИДЕОИГР

Аннотация. Актуальность темы обусловлена экспоненциальным ростом вычислительной сложности интерактивных систем, требующим перехода от монолитных архитектур к модульным экосистемам. Целью статьи выступает комплексный анализ эволюции графических конвейеров и подсистем управления памятью для выявления паттернов, повышающих эффективность производственных конвейеров. Сделан вывод о том, что алгоритмическая виртуализация геометрии и стандартизация аппаратных абстракций радикально снижают технический долг и время итераций, трансформируя разработку в оркестрацию готовых математических сервисов.

Ключевые слова: игровой движок, разработка видеоигр, программная инженерия, эффективность разработки, пайплайн производства, автоматизация процессов.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема экспоненциального роста сложности разработки программного обеспечения выступает фундаментальным вызовом для современной индустрии интерактивных систем: увеличение полигональных сеток, внедрение алгоритмов трассировки лучей и повышение требований к физическим симуляциям создают экстремальную нагрузку на инженерные команды. Разработка программного каркаса с нуля для каждого проекта выступает экономически нецелесообразной задачей и генерирует колоссальный технический долг. В подобных условиях специализированные инструментальные среды берут на себя роль катализатора эффективности: они абстрагируют низкоуровневое взаимодействие с *CPU* и *GPU*, стандартизируют конвейеры данных и предоставляют математические модели для решения рутинных задач. Переход от монолитных, аппаратно–зависимых решений к модульным экосистемам позволяет перераспределить вычислительные и человеческие ресурсы с написания базового кода на проектирование уникального пользовательского опыта, что делает анализ архитектурной эволюции критически важным для понимания современных производственных процессов [1].

Анализ аппаратных ограничений выявляет критическую зависимость: обращение к оперативной памяти требует сотен тактов ожидания, что вынуждает архитектуру программного обеспечения адаптироваться под иерархию *L1*/*L2 cache* и регистровый файл *CPU*. Игнорирование данного аппаратного барьера на уровне ядра приводит к катастрофическому падению

производительности и непредсказуемым задержкам кадра, что напрямую коррелирует с финансовыми рисками при выпуске продукта. Интеграция специализированных подсистем управления памятью, таких как линейные и пуловые аллокаторы, позволяет нивелировать накладные расходы стандартных библиотек и исключить фрагментацию кучи, формируя предсказуемую среду для масштабирования вычислительных задач и снижая порог входа для новых инженерных команд [11].

Дополнительным аспектом проблемы выступает исчерпание закона Мура в контексте повышения тактовых частот: современные процессоры компенсируют задержки доступа к памяти исключительно за счет увеличения количества ядер и ширины векторных регистров. Традиционные однопоточные циклы обновления состояния (*game loop*) оставляют большую часть транзисторов *CPU* в режиме простоя, что требует фундаментального пересмотра архитектуры ядра. Внедрение парадигмы *job systems* и систем распределения задач позволяет декомпозировать вычислительный граф на атомарные операции, минимизируя простои конвейера. Экономическая эффективность напрямую зависит от предсказуемости *frametime*: микрофризы, вызванные сборщиком мусора (*garbage collection*) или блокировками *mutexes*, разрушают пользовательский опыт и приводят к финансовым потерям. Переход к парадигме *data–oriented design* выступает не просто технической оптимизацией, а стратегическим императивом: уплотнение данных в структуры массивов (*Structure of Arrays*) гарантирует загрузку полезных байтов в кэш–линию, снижая нагрузку на шину памяти и высвобождая бюджет *CPU* для сложных симуляций.

МЕТОДОЛОГИЯ

Для оценки влияния архитектурных парадигм на скорость производственного цикла выполнен сравнительный анализ исторических и современных подходов к организации графических конвейеров и систем управления данными. В качестве ключевых критериев эффективности выступают следующие метрики: время, затрачиваемое на прототипирование базовых механик; скорость компиляции и итеративного обновления ресурсов в среде выполнения; степень автоматизации оптимизации контента; а также наличие и интеграция готовых библиотек ассетов [2]. Оценка базируется на анализе того, как эволюция от прямого манипулирования регистрами памяти к использованию высокоуровневых абстракций, таких как *Entity Component System* и виртуализированная геометрия, снижает порог входа для разработчиков и минимизирует количество ошибок, связанных с ручным распределением памяти и синхронизацией потоков [3].

Дополнительным вектором оценки выступает комплексный анализ: математическое моделирование пропускной способности *VRAM* при пакетной отправке команд через *command buffers* и измерение времени отклика

подсистем распределения задач в многопоточной среде. Критическим параметром выступает оценка кэш–локальности при итерации по массивам данных, где измеряется процент промахов кэша при использовании объектно–ориентированных графов в сравнении с плоскими массивами структур. Подобный подход позволяет количественно выразить влияние архитектурных решений на скорость компиляции шейдеров и время инициализации сцены, исключая субъективные факторы и опираясь исключительно на показания аппаратных счетчиков производительности и профилировщиков тактов *CPU* [12].

Анализ иерархии памяти требует детального рассмотрения ассоциативности кэша: при использовании объектно–ориентированных графов указатели часто хэшируются в одинаковые наборы кэш–линий, что вызывает конфликтные промахи. Переход к линейным массивам гарантирует: процессор загружает данные последовательно, полностью утилизируя механизм аппаратной предвыборки. Математическое моделирование пропускной способности шины показывает: уменьшение шага итерации до размера кэш–линии снижает латентность доступа к оперативной памяти на несколько порядков. Подобная оптимизация напрямую влияет на стабильность *frametime*: отсутствие задержек на чтение памяти исключает микрофризы, возникающие при ожидании поступления данных в регистры *CPU*.

Математический аппарат исследования опирается на теорию графов и анализ алгоритмической сложности: оценивается асимптотика операций выделения памяти O(1) для пуловых аллокаторов (*pool allocator*) в сравнении с O(n) для стандартных механизмов кучи. Эмпирическая база формируется посредством инструментального профилирования с использованием аппаратных счетчиков производительности (*Performance Monitoring Counters*), фиксирующих количество промахов кэша данных (*data cache miss*), промахов буфера ассоциативной трансляции (*TLB miss*) и ошибок предсказания ветвлений (*branch misprediction*). Сравнительный анализ графических конвейеров базируется на измерении латентности *CPU–GPU* при формировании буферов команд (*command buffers*) и оценке влияния барьеров памяти (*memory barriers*) на общую пропускную способность шины *PCIe*. Подобная строгая формализация критериев исключает субъективизм и позволяет математически доказать превосходство компонентных архитектур над объектно–ориентированными графами в контексте утилизации кэша *L1* и *L2* [14].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Эволюция инструментальных сред четко подразделяется на три фундаментальных этапа: первый охватывает эпоху низкоуровневой разработки, где программный код выступал неотделимым элементом логики

конкретного проекта и характеризовался жесткой привязкой к архитектуре целевого оборудования. При создании проектов для консолей, таких как *Sega Mega Drive*, графический конвейер реализовывался через прямое обращение к регистрам видеопроцессора *VDP* и использование аппаратных прерываний обратного хода луча *H–blank* [4]. Движки представляли собой монолитные ассемблерные вставки для процессора *Motorola 68000*, оптимизированные под конкретные лимиты *ROM* и *RAM*, что делало повторное использование кода практически невозможным. Сдвиг парадигмы произошел с появлением алгоритмов бинарного разбиения пространства *BSP* и программного *raycasting* в ядре *id Tech 1*: это позволило отделить математический каркас от ресурсов через введение контейнеров формата *WAD*, заложив фундамент для первого коммерческого лицензирования технологий и разделения ответственности между инженерами и дизайнерами уровней [5].

Детальный анализ математического аппарата первого этапа выявляет: алгоритмы бинарного разбиения пространства *BSP* выступали не просто методом оптимизации, а фундаментальной заменой аппаратного *Z–buffer*, отсутствующего в архитектурах того периода. Рекурсивное деление полигональных плоскостей на этапе препроцессинга формировало жестко структурированное дерево, позволяющее процессору выполнять линейный обход видимых секторов без динамических вычислений глубины в реальном времени. Подобный подход минимизировал количество операций с плавающей запятой, заменяя их целочисленной арифметикой с фиксированной точкой, что критически снижало нагрузку на регистры *CPU* и исключало дорогостоящие обращения к оперативной памяти. Параллельно с этим, технология программного *raycasting* для расчета столкновений и видимости опиралась на пошаговое сканирование двумерной сетки карты, где каждый луч инкрементально проверял пересечение с границами секторов. Отсутствие динамического выделения памяти в цикле рендеринга гарантировало детерминированное время выполнения кадра, а ручное управление регистрами видеопроцессора *VDP* через прерывания *H–blank* позволяло изменять параметры прокрутки и палитры непосредственно во время развертки луча кинескопа. Внедрение контейнерной файловой системы *WAD* радикально трансформировало конвейер данных: вместо перекомпиляции монолитного бинарного файла при каждом изменении текстуры или геометрии уровня, ресурсы загружались в оперативную память динамически через прямое отображение файлов в адресное пространство процесса. Это не только ускорило итерации дизайнеров, но и заложило архитектурный паттерн разделения исполняемого кода и данных, который впоследствии стал стандартом для всех высокопроизводительных систем реального времени.

Углубление в специфику аппаратных ограничений шестнадцатибитной эры требует детального рассмотрения следующих механизмов: прямого доступа к памяти (*DMA*) и математического аппарата с фиксированной точкой (*fixed–point arithmetic*). Отсутствие аппаратных блоков вычислений с плавающей запятой (*FPU*) в центральном процессоре консолей вынуждало инженеров эмулировать дробные числа посредством целочисленных сдвигов битов, что требовало ручного контроля за переполнением регистров и потерей точности при масштабировании спрайтов. Контроллер *DMA* позволял видеопроцессору *VDP* считывать тайловые карты и палитры напрямую из *ROM*, минуя центральный процессор и освобождая такты *CPU* для расчета игровой логики и опроса портов ввода. Архитектура памяти строго диктовала компоновку данных: таблицы синусов и косинусов, необходимые для расчета траекторий и псевдотрехмерного масштабирования, предварительно вычислялись и жестко прошивались в картридж, исключая дорогостоящие операции тригонометрии в реальном времени: таблицы поиска (*lookup tables*) выступали единственным способом обеспечения плавности анимации и движения. Формирование списка спрайтов (*sprite list*) происходило в специально выделенной области *RAM*, откуда *VDP* автоматически считывал координаты и атрибуты объектов при каждом обратном ходе луча, что гарантировало аппаратную сортировку по глубине без участия программного кода.

Второй этап характеризуется стандартизацией трехмерной графики и строгим разделением труда. Переход к аппаратным видеоускорителям и унификация графических *API*, таких как *OpenGL* и *DirectX*, обеспечили появление универсальных коммерческих решений [6]. Конкуренция архитектурных стеков, представленная ядрами *id Tech 3* и *Unreal Engine 1*, перевела фокус индустрии с написания кастомных математических библиотек для трансформации вершин на непосредственное создание контента. Внедрение специализированных редакторов уровней, таких как *Hammer Editor*, и интеграция сторонних физических модулей, в частности *Havok*, гарантировали изоляцию ответственности. Дизайнеры получили возможность настраивать сложные пространственные головоломки, симуляцию *ragdoll–* физики и триггерные скрипты через визуальные интерфейсы, полностью исключив необходимость постоянного привлечения инженеров для модификации базового кода и расчета инерции [7].

Архитектурный переход ко второму этапу сопровождался фундаментальной сменой парадигмы взаимодействия с графическим оборудованием: унификация программных интерфейсов *OpenGL* и *DirectX* позволила инкапсулировать аппаратно–зависимые инструкции драйверов в стандартизированные состояния конвейера рендеринга. Внедрение модели фиксированных функций *fixed–function pipeline* освободило инженерные

ресурсы от ручной реализации матричных преобразований вершин и растеризации треугольников, переложив данные операции на специализированные блоки видеоускорителей. Конкуренция между ядрами *id Tech 3* и *Unreal Engine 1* стимулировала развитие модульных архитектур, где сетевой код, система частиц и менеджер анимаций функционировали как изолированные подсистемы с четко определенными интерфейсами обмена данными. Интеграция сторонних физических промежуточных решений, таких как *Havok*, продемонстрировала эффективность аутсорсинга сложных математических вычислений: вместо написания кастомных солверов ограничений и алгоритмов обнаружения столкновений *collision detection*, разработчики получали оптимизированные бинарные библиотеки, использующие векторные инструкции *SIMD* для параллельной обработки твердых тел. Появление визуальных редакторов *Hammer Editor* и *UnrealEd* трансформировало производственный конвейер: импорт геометрии из пакетов *3ds Max* и *Maya* осуществлялся через автоматизированные конвейеры конвертации, а настройка триггерной логики и запекание статического освещения в карты светимости *lightmaps* выполнялись без вмешательства в исходный код ядра. Подобное разделение ответственности радикально сократило цикл обратной связи между дизайнерами и программистами, минимизировало риски возникновения состояний гонки при доступе к общим ресурсам и сформировало устойчивую экосистему, где технический долг контролировался за счет строгой инкапсуляции подсистем и использования верифицированных промежуточных модулей.

Фундаментальным прорывом второго этапа выступает переход от жестко заданных состояний конвейера к программируемым шейдерным моделям: это позволило перенести математические операции векторного и матричного умножения, расчета скалярных произведений и интерполяции атрибутов вершин непосредственно на параллельные архитектуры *GPU*. Инженеры получили возможность реализовывать сложные модели освещения, такие как *Blinn–Phong* или анизотропное отражение, без модификации базового кода ядра, передавая лишь *uniform*–переменные и указатели на текстуры через языки высокого уровня *HLSL* и *GLSL*. Параллельно с графическими инновациями происходила стандартизация сетевых архитектур: переход от пиринговых топологий (*peer–to–peer*) к модели выделенного сервера (*dedicated server*) с авторитетным состоянием потребовал внедрения алгоритмов предсказания на стороне клиента (*client–side prediction*) и сглаживания рассинхронизации (*lag compensation*). Подобные математические модели экстраполяции позиций и квантования векторов состояния позволили компенсировать задержки передачи пакетов по протоколу *UDP*, что радикально повысило эффективность разработки мультиплеерных систем и снизило количество жалоб на сетевые задержки.

Интеграция физических подсистем опирается на сложные математические алгоритмы обнаружения пересечений: наивный перебор всех пар объектов имеет квадратичную сложность, что неприемлемо для систем реального времени. Внедрение алгоритма *Gilbert–Johnson–Keerthi* и использование ограничивающих объемов, таких как *AABB* и *OBB*, позволяет свести задачу к проверкам выпуклых многогранников в пространстве Минковского. Современные физические движки активно применяют *SIMD*–инструкции для параллельного расчета векторов нормалей и импульсов столкновений. Вычислительный бюджет, сэкономленный на оптимизации данных алгоритмов, перенаправляется на увеличение количества симулируемых твердых тел и повышение частоты дискретизации физического шага, что косвенно повышает итоговое качество продукта за счет отсутствия туннелирования объектов сквозь преграды при высоких скоростях.

Третий этап отличается демократизацией экосистем и алгоритмической виртуализацией в средах, подобных *Unity* и *Unreal Engine 5*. Внедрение технологий виртуализированной геометрии *Nanite*, оперирующей микрополигональными кластерами посредством *compute shaders*, и динамического глобального освещения *Lumen* на основе *SDF* автоматически решает задачи отсечения невидимых граней и расчета многократных отражений [8]. Подобный подход исключает трудоемкий процесс ручного создания уровней детализации *LOD* и запекания карт света в *VRAM*, экономя тысячи человеко–часов. Дополнительным фактором эффективности выступают встроенные маркетплейсы ассетов и системы компонентной архитектуры: они позволяют собирать функциональные прототипы из готовых математических и логических блоков за дни, трансформируя разработку в высокоуровневую оркестрацию сервисов и минимизируя простои *GPU* [9]. Интеграция принципов *data–oriented design* в современные конвейеры гарантирует кэш–локальность и предсказуемость *frametime*, что выступает финальным аргументом в пользу отказа от устаревших объектно–ориентированных графов [10].

Углубленный анализ третьего этапа выявляет: внедрение *compute shaders* позволяет перенести задачи пространственного разбиения и отсечения невидимых граней непосредственно на параллельные архитектуры *GPU*, минуя узкие места традиционного графического конвейера. Технология виртуализированной геометрии оперирует иерархическими кластерами треугольников: на этапе препроцессинга исходная высокополигональная сетка рекурсивно разбивается на группы, для которых рассчитываются ограничивающие объемы и таблицы смещений. В режиме реального времени вычислительные шейдеры анализируют проекцию данных кластеров в экранном пространстве и динамически подгружают из *VRAM* лишь те уровни детализации, площадь которых превышает один пиксель. Подобный

алгоритмический подход полностью исключает необходимость ручного создания прокси–моделей и карт нормалей, высвобождая колоссальные объемы памяти и вычислительного бюджета. Параллельно с геометрической виртуализацией происходит трансформация подсистем глобального освещения: отказ от статического запекания карт светимости в пользу динамических методов на основе полей подписанных расстояний. Хранение сцены в виде трехмерных текстур *SDF* позволяет алгоритмам трассировки лучей аппаратно ускоренного *ray tracing* или программным fallback–методам мгновенно определять пересечения лучей с геометрией и рассчитывать многократные переотражения фотонов. Интеграция принципов *data–oriented design* и архитектуры *Entity Component System* в современные производственные конвейеры обеспечивает идеальную кэш–локальность при обновлении миллионов сущностей: системы итерируют по непрерывным массивам компонентов, применяя *SIMD*–инструкции для параллельного расчета матриц трансформации и векторов скоростей. Наличие глобальных маркетплейсов ассетов и систем визуального скриптинга трансформирует процесс прототипирования: вместо написания низкоуровневого кода управления памятью инженеры оркестрируют готовые математические сервисы, что радикально сокращает время вывода продукта на рынок и минимизирует риски возникновения состояний гонки в многопоточной среде.

Архитектурный анализ современных экосистем выявляет доминирование структур массивов над массивами структур в рамках парадигмы *Entity Component System*: при использовании формата *AoS* итерация по конкретному свойству требует загрузки в кэш–линию *CPU* множества неиспользуемых полей, что провоцирует катастрофические промахи кэша. Формат *SoA* упаковывает однородные данные в непрерывные блоки, позволяя компилятору автоматически генерировать *SIMD*–инструкции для одновременного обновления сотен матриц трансформации за один такт. В многопоточных подсистемах распределения задач (*job systems*) классические примитивы синхронизации заменяются на безблокировочные структуры данных (*lock–free data structures*), базирующиеся на атомарных операциях сравнения с обменом (*compare–and–swap*). Это исключает переключения контекста операционной системы и взаимные блокировки (*deadlocks*). В графических конвейерах, использующих аппаратную трассировку лучей (*hardware ray tracing*), ключевую роль играют иерархии ограничивающих объемов (*Bounding Volume Hierarchies, BVH*), которые препроцессируются в деревья для логарифмического поиска пересечений, что делает расчет глобального освещения и отражений математически разрешимой задачей в рамках жесткого бюджета шестнадцати миллисекунд на кадр.

Организация многопоточных вычислений в современных ядрах базируется на принципах отсутствия блокировок: классические мьютексы

заменяются на атомарные операции и безблокировочные очереди. Алгоритм *compare–and–swap* позволяет потокам безопасно извлекать задачи из глобального пула без переключения контекста операционной системы. Диспетчеры задач используют стратегию кражи работы: при опустошении локальной очереди поток обращается к стекам других ядер, обеспечивая стопроцентную утилизацию многопоточного *CPU*. Математическая строгость данных подходов исключает взаимные блокировки и инверсию приоритетов: граф зависимостей задач строится на этапе компиляции или инициализации сцены, а в режиме реального времени происходит лишь детерминированное исполнение атомарных функций. Это позволяет масштабировать симуляции на десятки ядер без деградации производительности и гарантирует: каждый кадр обрабатывается строго за отведенные шестнадцать миллисекунд.

Оценка качества программного продукта в контексте низкоуровневой архитектуры полностью исключает субъективные метрики и фокусируется на детерминизме вычислений: стабильное распределение памяти и отсутствие фрагментации кучи выступают гарантом предсказуемости *frametime*. Использование языков со встроенным сборщиком мусора неизбежно порождает паузы на обход графов объектов и освобождение памяти, что проявляется в виде катастрофических микрофризов. Специализированные аллокаторы, такие как арена–аллокаторы и пулы, решают данную проблему: выделение памяти сводится к инкременту указателя, а освобождение происходит мгновенно путем сброса состояния. Подобная предсказуемость высвобождает вычислительный бюджет: вместо борьбы с задержками шины памяти и ожидания синхронизации потоков, процессорные ядра занимаются сложными вычислениями траекторий и алгоритмами искусственного интеллекта. Кэш–локальность данных гарантирует: математические операции выполняются без простоев арифметико–логического устройства, что напрямую формирует плавный визуальный ряд и отсутствие задержек ввода, являющихся критическими факторами качества в интерактивных средах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения комплексного научно–исследовательского анализа эволюции низкоуровневой архитектуры получены фундаментальные теоретические знания о принципах взаимодействия программного кода и аппаратных ресурсов современных вычислительных систем: изучены механизмы работы иерархической памяти, включая особенности функционирования регистров процессора, *L1*, *L2* и *L3 cache*, а также алгоритмы предсказания ветвлений и спекулятивного выполнения инструкций на уровне микроархитектуры; глубоко исследована парадигма *data–oriented design*, раскрывающая методы трансформации объектно–ориентированных графов в линейные структуры данных для максимизации пространственной и временной кэш–локальности; освоены концепции архитектуры *Entity*

Component System, демонстрирующие пути деконструкции сущностей на изолированные пулы компонентов и итераторы–системы, что обеспечивает идеальное выравнивание данных под размер кэш–линии и открывает возможности для автоматической векторизации с применением *SIMD*–инструкций; детально рассмотрены математические модели распределения вычислительной нагрузки в рамках парадигмы *job systems*, базирующиеся на алгоритмах *work–stealing* и локальных очередях задач, что позволяет полностью исключить использование примитивов блокировки, таких как *mutexes*, и предотвратить состояния гонки; проанализированы спецификации явных графических *API*, в частности *Vulkan* и *DirectX 12*, выявлены принципы формирования *command buffers*, управления состояниями ресурсов и расстановки *memory barriers* для синхронизации конвейеров *CPU* и *GPU*, а также изучены алгоритмы виртуализации геометрии и поля подписанных расстояний *SDF*, что формирует целостное понимание того, как скрытые математические абстракции ядра устраняют необходимость ручной оптимизации контента и гарантируют предсказуемость *frametime*.

На базе усвоенного теоретического материала сформированы устойчивые умения в области проектирования высокопроизводительных подсистем ядра программного обеспечения: разработаны умения создавать специализированные аллокаторы динамической памяти, включая линейные *linear allocator*, стэковые *stack allocator* и пуловые *pool allocator* механизмы, гарантирующие константное время выделения ресурсов O(1) и полное отсутствие фрагментации кучи в режиме реального времени; освоены методы профилирования узких мест производительности с использованием аппаратных счетчиков для детекции промахов кэша и ложного разделения кэш–линий между независимыми потоками; приобретены умения проектировать многопоточные диспетчеры задач с жесткой привязкой потоков–работников к физическим ядрам *CPU*, обеспечивающие детерминированное выполнение математических и логических операций в пределах строго заданного временного бюджета кадра; сформированы умения выстраивать оптимальные графы зависимостей графических ресурсов, минимизирующие простои видеоускорителя за счет явного указания барьеров памяти и пакетной отправки команд рендеринга; отработаны подходы к рефакторингу устаревших объектно–ориентированных иерархий в плоские массивы структур, что позволяет радикально снизить накладные расходы на чтение памяти и высвободить вычислительный бюджет для нужд сложных физических симуляций и алгоритмов искусственного интеллекта без ущерба для общей стабильности частоты кадров.

В ходе практического применения исследованных архитектурных паттернов закреплены прикладные навыки системного программирования и низкоуровневой оптимизации: отточены навыки написания чистого,

лишенного побочных эффектов кода на языках со строгим управлением памятью, где каждая функция спроектирована как атомарная задача, принимающая неизменяемые срезы данных и возвращающая предсказуемый результат; развиты навыки ручной и автоматической векторизации математических вычислений с использованием интринсиков *intrinsics* для параллельной обработки множеств трансформаций и векторов скоростей за один такт процессора; получены навыки интеграции разрозненных подсистем управления памятью, многопоточного планирования и графического конвейера в единый, отказоустойчивый каркас ядра, способный масштабироваться на многоядерные архитектуры без возникновения взаимных блокировок и инверсии приоритетов; сформированы навыки оценки технического долга на этапе проектирования, позволяющие отказываться от удобных, но недетерминированных высокоуровневых абстракций в пользу явного, полностью контролируемого системного кода; приобретены навыки стратегического планирования производственных процессов, основанные на анализе предоставляемых движком визуальных интерфейсов и систем компонентной архитектуры, что в конечном итоге гарантирует отсутствие микрофризов, предсказуемость выделения ресурсов и высочайшую степень надежности разрабатываемого программного продукта в условиях экстремальных вычислительных нагрузок.

Список литературы:

1. Gregory J. Game Engine Architecture // CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019. – 1200 с.

2. Нистром Р. Паттерны программирования игр // ЭКСМО. – 2022. – 432 с.

3. Fabian R. Data–Oriented Design: Software Engineering for Limited Resources and Short Schedules // Richard Fabian. – 2018. – 308 p.

4. Akenine–Moller T., Haines E., Hoffman N. Real–Time Rendering // CRC Press. – 2018. – 1198 p. DOI: 10.1201/b22086

5. Lengyel E. Foundations of Game Engine Development: Rendering // Terathon Software LLC. – 2016. – 397 p.

6. Eberly D. H. 3D Game Engine Design: a practical approach to real–time computer graphics // CRC Press. – 2006. – 1040 p.

7. McShaffry M. Game Coding Complete // Course Technology PTR. – 2013. – 911 p.

8. Buckland M. Programming Game AI by Example // Jones & Bartlett Learning. – 2005. – 495 p.

9. Pharr M., Jakob W., Humphreys G. Physically Based Rendering: from theory to implementation: third edition // Physically based rendering: from theory to implementation: third edition. – Elsevier Inc., 2016. – P. 1-1233. EDN: YWVEMV

10. Hughes J. F. Computer Graphics: principles and practice // Addison–Wesley. – 2014. – 1209 p.

УДК 004.928:159.9

Москалюк М. В., Солдатова С. С., Синкина В. Е.
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ДИЕГЕТИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОТОКА В ВИДЕОИГРАХ

Аннотация. Статья посвящена анализу влияния диегетического интерфейса на восприятие игры и вхождение пользователя в состояние потока. Рассмотрены преимущества и ограничения диегетического подхода на примере культовых игровых проектов.

Ключевые слова: Диегетический интерфейс, состояние потока, иммерсивность, пользовательский интерфейс, игровой дизайн, восприятие игры, человеко-машинное взаимодействие.

Введение

Современная игровая индустрия переживает этап активного поиска средств для усиления иммерсивности игрового опыта. Одним из ключевых направлений этого развития является трансформация пользовательского интерфейса. Традиционный Heads-Up Display или HUD, выводящий информацию поверх игрового экрана, все чаще критикуется за разрушение «четвертой стены» и отвлечение пользователя от нарративного пространства [1; 5]. На смену ему приходят более сложные и интегрированные решения, центральное место среди которых занимает диегетический интерфейс.

Термин «диегезис» в теории повествования обозначает внутренний мир произведения, его нарративную вселенную. Применительно к игровым интерфейсам это означает, что элементы управления и индикации существуют не как абстрактные графические объекты для игрока, а как реальные, ощутимые объекты или явления в игровом мире, доступные для восприятия самим персонажем [2; 4]. Примерами могут служить индикатор здоровья, встроенный в костюм протагониста (Dead Space), лазерный прицел, исходящий непосредственно из оружия, или карта, представленная в виде голограммы [3]. пример диегетического интерфейса в игре Dead Space представлен на рисунке 1.

Рисунок 1 – Пример диегетического интерфейса (Dead Space)

Проблема исследования заключается в недостаточной систематизации знаний о том, как именно диегетический дизайн интерфейсов влияет на психологическое состояние игрока, в частности на достижение состояния потока – оптимального переживания, характеризующегося полной поглощенностью деятельностью.

Цель исследования – изучить влияние диегетического интерфейса на восприятие игры и формирование состояния потока у пользователей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. определить понятие и классифицировать типы игровых интерфейсов в рамках диегетической теории;
2. рассмотреть концепцию состояния потока (flow) применительно к игровой деятельности;
3. проанализировать механизмы влияния диегетического интерфейса на когнитивные процессы игрока, способствующие погружению;
4. выявить преимущества и ограничения использования диегетического интерфейса в играх различных жанров.

Объект исследования – пользовательские интерфейсы в видеоиграх и их воздействие на игровой опыт.

Предмет исследования – диегетический интерфейс как средство достижения состояния потока и повышения иммерсивности.

Концепция диегезиса, пришедшая в игровой дизайн из теории кино и литературы, предлагает четкую классификацию элементов интерфейса в зависимости от их отношения к игровому миру. Согласно этой классификации, интерфейсы делятся на четыре типа [1; 4].

1. Диегетический (Diegetic): Элементы являются физической частью игрового пространства и доступны персонажу. Пример: индикатор здоровья на спине героя в Dead Space, обозначение количества кислорода, через часы протагониста в Metro Last Light.

2. Пространственный (Spatial): Элементы привязаны к объектам в мире, но сами персонажи их не видят. К ним относятся маркеры над головами союзников, индикаторы здоровья над врагами, подсветка интерактивных объектов.

3. Мета-интерфейс (Meta): Элементы служат для передачи состояний, но не являются частью игровой вселенной. Это визуальные эффекты вроде покрасневшего экрана при оглушении (Sifu) или обесцвечивание картинки для имитации потери сознания (Uncharted).

4. Недиегетический (Non-Diegetic): Традиционный HUD, существующий вне игрового мира и видимый только игроку. Сюда относятся полосы здоровья, мини-карты, счетчики патронов, расположенные по углам экрана.

Переход к диегетическим или пространственным решениям рассматривается как способ минимизации недиегетических «артефактов», разрывающих погружение. Теоретически, это позволяет удерживать внимание пользователя исключительно на игровой реальности, что является прямым путем к достижению состояния потока.

Результаты исследования

В зарубежной и отечественной психологии состояние потока определяется как пиковое переживание, возникающее при полной вовлеченности человека в текущую деятельность [6; 7]. Для видеоигр это состояние особенно важно, так как именно оно превращает процесс в глубоко удовлетворяющее занятие. Согласно Джесси Шеллу, автору фундаментального труда «The Art of Game Design: A Book of Lenses», одним из ключевых условий достижения состояния потока является баланс между сложностью игровых задач и уровнем мастерства игрока. Шелл выделяет четыре критерия, необходимых для вхождения в это состояние: наличие у игрока четких целей, отсутствие отвлекающих факторов, немедленная обратная связь на его действия и непрерывный поток задач, сложность которых растет по мере развития его навыков. Если сложность растет слишком быстро, игрок испытывает тревогу, если слишком медленно – скуку. Таким образом, для достижения потока дизайнеру необходимо обеспечить плавное и сбалансированное нарастание вызовов. Диегетический интерфейс оказывает прямое и опосредованное влияние на большинство этих элементов, особенно на отсутствие отвлекающих факторов и немедленную обратную связь.

Классический HUD требует от игрока постоянного переключения внимания между динамичным игровым действием в центре экрана и статичными индикаторами по его краям. Это создает когнитивные «микро-разрывы», мешающие непрерывному восприятию.

Диегетический интерфейс решает эту проблему, встраивая важнейшие данные в саму сцену. Так, в Dead Space шкала здоровья и энергии стазиса

расположена на спине персонажа, что заставляет игрока фокусироваться на центре экрана, откуда чаще всего появляется угроза [2; 3]. Это не только повышает иммерсивность, но и тренирует периферийное зрение для отслеживания критических параметров, снижая когнитивную нагрузку на переключение внимания. Эти факторы были наиболее важными критериями при выборе диегетического интерфейса, ведь в жанре Survival horror очень важно, чтобы игрок вник в происходящее благодаря чему «позволял» игре пугать его.

Ключевая функция диегетического интерфейса – сохранение целостности нарратива и, как следствие, усиление эффекта присутствия. Когда игрок видит информацию так, как ее видит его персонаж (например, через голографический проектор на запястье), стирается грань между субъектом (игроком) и объектом (аватаром) управления. Как отмечается в исследованиях иммерсивных сред, такая конгруэнтность является мощным катализатором для возникновения состояния потока, поскольку игрок перестает воспринимать интерфейс как инструмент управления и начинает воспринимать его как часть себя в игровом мире [5; 6].

Особенно ярко потенциал диегетического подхода раскрывается в сфере виртуальной реальности, где он становится не просто предпочтительным, а необходимым условием для достижения качественной иммерсии [5].

Это иллюстрирует, что в иммерсивных средах диегетический интерфейс перестает быть дизайнерским «приемом» и становится базовым условием для достижения качественного состояния потока [9].

Несмотря на очевидные преимущества, диегетический интерфейс не является универсальным решением. Его реализация сопряжена с рядом серьезных вызовов [3; 9].

1. Видимость и доступность информации: встраивание данных в игровой мир лишает их постоянного места на экране. В Dead Space разработчикам пришлось специально ограничить свободу камеры, чтобы игрок всегда мог видеть индикатор на спине персонажа. В играх с высокой динамикой или свободным управлением камерой (например, шутерах от первого лица) диегетические элементы могут быть просто не видны пользователю в критический момент.

2. Информационная емкость: через внутриигровые объекты сложно передать большой объем сложной, абстрактной информации (например, тактическую карту, дерево навыков или длинный список квестов). Использование диегетических планшетов или книг требует времени и отвлекает от действия, что может нарушить динамику потока [9].

3. Сложность и стоимость разработки: создание анимированных 3D-моделей для отображения данных в мире значительно дороже и сложнее, чем создание статичных 2D-спрайтов для HUD.

Заключение

Таким образом, диегетический интерфейс является мощным и перспективным инструментом современного игрового дизайна, направленным на углубление иммерсивности и облегчение вхождения игрока в состояние потока. Интегрируя элементы управления и индикации в нарративное пространство, диегетический подход способствует снижению когнитивной нагрузки, сохранению целостности восприятия и усилению эмпатии к игровому персонажу.

Однако его эффективность критически зависит от жанра игры, темпа игрового процесса и контекста использования. Непродуманное применение может привести к обратному эффекту, делая информацию труднодоступной и фрустрирующей игрока. Будущее за гибридными решениями и адаптивными системами, которые умело сочетают диегетические, пространственные и мета-элементы, предлагая игроку оптимальную модель взаимодействия для каждого конкретного сценария. Особенно ярко потенциал диегетического подхода раскрывается в сфере виртуальной реальности, где он становится не просто предпочтительным, а необходимым условием для достижения качественной иммерсии.

Список литературы:

1. Войскунский А. Е. Психология и интернет // М.: Акрополь, 2010. – 439 с. EDN: QYBLKR
2. Markers I: A deep dive into Dead Space’s UI [Electronic resource] // Giant Bomb. – URL: https://www.giantbomb.com/dead-space/3025-1229/forums/markers-i-a-deep-dive-into-dead-spaces-ui-1888120/ (дата обращения: 24.06.2026).
3. Markers II: Where are all the Dead Space UIs [Electronic resource] // Giant Bomb. – URL: https://www.giantbomb.com/dead-space/3025-1229/forums/markers-ii-where-are-all-the-dead-space-uis-1888332/ (дата обращения: 24.06.2026).
4. Understanding UX in video games: the diegesis theory [Electronic resource] // UX Collective. – URL: https://uxdesign.cc/understanding-ux-in-video-games-diegesis-theory-f59d5a94cbcf (дата обращения: 24.06.2026).
5. Seo G. Implementation of immersive virtual reality through the analysis of diegetic user interface // HCII, Communications in Computer and Information Science. – Springer, 2020. – Vol. 1225. – P. 116–121. DOI: 10.1007/978-3-030-50729-9_16
6. Csikszentmihalyi M. Flow: The Psychology of Optimal Experience. – New York: Harper & Row, 1990.
7. Sweetser P., Wyeth P. GameFlow: A Model for Evaluating Player Enjoyment in Games // ACM Computers in Entertainment. – 2005. – Vol. 3, № 3. – Article 3. DOI: 10.1145/1077246.1077253
8. Seo G., Bae BC. Towards the Utilization of Diegetic UI in Virtual Reality Educational Content // Communications in Computer and Information Science. – 2018. – Vol. 852. – P. 111-115.
9. Пировских В. Н. Применение теории диегезиса при проектировании VR-интерфейсов // XIII конгресс молодых ученых. – СПб: Университет ИТМО, 2024. – С. 201-204. EDN: BIQWIO

UDC 621.313.2:004.896

Fajr Afasha
Scientific supervisor: Borisov O., PhD, Professor
ITMO University, Saint Petersburg, Russia

NOISE-ROBUST ESTIMATION IN DC MOTORS

Abstract. DC motors remain one of the most widely used actuator technologies in robotic and mechatronic systems due to their low cost, simple structure, and straightforward control implementation. However, practical applications are significantly affected by measurement noise, sensor limitations, parameter uncertainty, and time-varying load torque. These factors reduce estimation accuracy and degrade control performance, particularly when velocity and disturbance information are obtained through noisy differentiation. This paper investigates modern approaches to noise-robust estimation in DC motor drives and proposes an integrated framework that combines measurement preprocessing, model-based velocity estimation, load torque reconstruction, and disturbance compensation. The proposed approach emphasizes the joint tuning of filtering and observer dynamics to improve robustness under realistic operating conditions. The analysis demonstrates that co-design of estimation and compensation mechanisms can significantly enhance tracking accuracy, disturbance rejection, and robustness in robotic drive systems.

Keywords: DC motor drives, noise-robust estimation, load torque estimation, disturbance observer, adaptive observer, robotic actuators.

1. Introduction

Electric drives constitute a fundamental component of modern robotic systems. Mobile robots, manipulators, autonomous vehicles, and mechatronic platforms rely on electric actuators to generate accurate and repeatable motion. Among various drive technologies, DC motors continue to occupy an important position because of their simplicity, favorable cost-performance ratio, and ease of integration into digital control systems [1].

Despite these advantages, practical operation of DC motor drives is often affected by measurement uncertainty and external disturbances. Speed measurements obtained from incremental encoders or Hall-effect sensors are subject to quantization errors, sampling limitations, and electromagnetic interference. Current measurements may contain switching noise and sensor inaccuracies. Simultaneously, the mechanical load torque acting on the motor shaft varies because of payload changes, friction drift, gear transmission effects, and interaction with the environment [2].

These uncertainties create substantial challenges for control and estimation algorithms. Reliable reconstruction of motor velocity and disturbance torque is essential for high-performance motion control. However, direct differentiation of measured signals amplifies noise and often leads to unstable estimation results.

Consequently, modern motor-control systems increasingly rely on observer-based estimation methods capable of reconstructing unmeasured states and disturbances while maintaining robustness to measurement noise [3].

The objective of this study is to analyze contemporary approaches to noise-robust estimation in DC motor drives and to develop an integrated estimation framework suitable for robotic applications operating under uncertain and noisy conditions.

2. Research Problem

The central problem addressed in this work is the online estimation of motor velocity and load torque in the presence of noisy measurements and uncertain system parameters. Accurate reconstruction of these quantities is required for disturbance compensation, adaptive control, and trajectory-tracking improvement.

A simplified DC motor can be represented by coupled electrical and mechanical dynamics. While current and position measurements are often available, velocity and acceleration must frequently be reconstructed from noisy sensor signals. Since disturbance torque estimation depends directly on mechanical-state information, errors in velocity estimation propagate into disturbance reconstruction and subsequently affect compensation performance [4].

In practical robotic systems, three major challenges arise:

1. Measurement noise originating from sensors and data-acquisition systems.
2. Time-varying load torque caused by payload changes and environmental interaction.
3. Parameter uncertainty associated with inertia, friction, and electrical characteristics.

These factors motivate the development of estimation methods that remain reliable despite imperfect sensing conditions and model mismatch.

3. Review of Existing Estimation Approaches

3.1 Disturbance Observers

Disturbance Observer (DOB) architectures represent one of the most widely used approaches for disturbance estimation in motion-control systems [5]. The basic principle consists of reconstructing the lumped disturbance using a nominal plant model and compensating it through an auxiliary control channel.

DOB methods offer strong disturbance rejection capabilities and relatively simple implementation. However, their performance depends heavily on observer bandwidth. Increasing bandwidth improves disturbance tracking but simultaneously amplifies measurement noise and sensitivity to modeling errors. This bandwidth-noise trade-off remains one of the primary limitations of disturbance-observer-based control [6].

3.2 Adaptive Observers

Adaptive observers estimate both system states and uncertain parameters simultaneously [7]. These methods are particularly attractive in robotic systems where friction, inertia, and load conditions vary over time.

Adaptive estimation techniques can compensate for parameter drift and improve long-term estimation accuracy. Nevertheless, their performance depends on excitation conditions and the quality of measured signals. Noisy regressors may significantly reduce convergence speed and estimation precision.

3.3 Kalman Filtering Approaches

Kalman Filter (KF) and Extended Kalman Filter (EKF) techniques provide a probabilistic framework for state estimation under uncertainty [8]. These methods explicitly model process and measurement noise and often achieve excellent estimation performance when model assumptions are valid.

However, practical implementation of Kalman-based estimators requires careful covariance tuning and relatively high computational resources. In embedded robotic applications, these requirements may limit their attractiveness compared with simpler observer structures.

3.4 Extended State Observers

Extended State Observers (ESO) and Active Disturbance Rejection Control (ADRC) frameworks estimate unknown disturbances as augmented system states [9]. Instead of identifying individual disturbance sources, ESO methods reconstruct a generalized disturbance that includes friction effects, parameter uncertainty, and external loads.

Although ESOs demonstrate strong robustness properties, increasing observer bandwidth can introduce peaking phenomena and noise amplification. Therefore, proper tuning remains critical for successful implementation.

4. Proposed Noise-Robust Estimation Framework

The proposed framework is based on the principle that measurement preprocessing, state estimation, and disturbance compensation should not be designed independently. Instead, they must be considered as interconnected components of a unified estimation architecture.

The framework consists of three primary stages.

4.1 Measurement Preprocessing

The first stage aims to improve signal quality before state estimation. Encoder-derived speed signals and current measurements are processed using a combination of median filtering and adaptive low-pass filtering.

Median filtering effectively suppresses impulsive outliers caused by communication errors or sensor glitches. Adaptive low-pass filtering reduces high-frequency noise while minimizing phase delay. The One Euro Filter represents a particularly attractive solution because its cutoff frequency adapts to signal

dynamics, providing strong smoothing during steady-state operation and low latency during rapid motion [10].

4.2 Model-Based Velocity and Load Torque Estimation

After signal conditioning, a model-based estimator reconstructs velocity and load torque. Several observer families can be utilized, including Luenberger observers, disturbance observers, adaptive observers, and Kalman-based estimators.

The key design objective is to avoid direct numerical differentiation of noisy position measurements. Instead, observer dynamics should reconstruct mechanical states using the motor model and available sensor information. This approach significantly improves robustness under realistic measurement conditions.

4.3 Disturbance Compensation

The estimated load torque is subsequently incorporated into the control loop through feedforward compensation. Disturbance compensation reduces steady-state tracking error and improves transient performance during load changes.

When properly tuned, the compensation mechanism increases robustness to payload variation and friction uncertainty. However, excessive compensation gain may amplify estimation errors and destabilize the system. Therefore, compensation design must account for estimator accuracy and delay characteristics.

5. Validation Methodology

To evaluate the effectiveness of the proposed framework, several representative robotic operating scenarios should be considered.

The first scenario involves low-speed motion, where encoder quantization effects become particularly significant. The second scenario examines abrupt load-torque variations caused by payload changes or environmental interaction. The third scenario introduces slowly varying disturbances associated with friction drift and mechanical wear. Finally, robustness should be assessed under increased measurement noise and sensor degradation.

Performance evaluation should include both estimation and control metrics. Velocity estimation error, load-torque reconstruction accuracy, tracking error, settling time, steady-state error, and noise amplification indicators provide comprehensive insight into system performance. Additionally, computational complexity and implementation feasibility should be considered because practical robotic systems often operate on resource-constrained embedded hardware.

6. Discussion

The literature demonstrates that no single estimator family simultaneously satisfies all practical requirements of robotic motor drives. Disturbance observers provide excellent disturbance rejection but exhibit bandwidth limitations. Adaptive observers handle parameter uncertainty but require sufficient excitation. Kalman-based estimators offer systematic noise treatment but increase computational

burden. Extended state observers provide generalized disturbance estimation yet remain sensitive to bandwidth selection.

The proposed co-design framework addresses these limitations by integrating measurement conditioning, state estimation, and disturbance compensation within a unified architecture. Such integration allows the designer to balance noise suppression, estimation latency, and disturbance-rejection performance according to application-specific requirements.

An important practical advantage of this approach is its flexibility. Different estimator families may be employed within the same framework depending on computational constraints and performance objectives. Consequently, the proposed methodology provides a general foundation for robust robotic drive control rather than promoting a single estimation technique.

7. Conclusion

This paper examined the problem of noise-robust estimation in DC motor drives operating under realistic robotic conditions. The analysis showed that reliable load torque compensation depends on accurate velocity estimation, while accurate velocity estimation depends on effective measurement preprocessing. Consequently, these elements should be treated as a unified co-design problem rather than as independent engineering tasks.

A comprehensive framework integrating measurement preprocessing, model-based estimation, and disturbance compensation was proposed. The framework emphasizes low-latency signal conditioning, observer-based state reconstruction, and feedforward disturbance rejection. The expected benefits include improved velocity estimation, more accurate load torque reconstruction, reduced tracking error, and enhanced robustness to sensor degradation and load uncertainty.

Future research should focus on experimental validation of the proposed framework, comparative evaluation of observer families under identical operating conditions, and extension of the methodology to multi-axis robotic systems and advanced electric-drive architectures.

References:

1. Petro V., Kyslan K. Sensorless Control of PMSM in Low-Speed Region Using HF Pulse Signal Injection Method // Acta Electrotechnica et Informatica. – 2022. – Vol. 22, No. 1. – P. 18–23. DOI: 10.2478/aei-2022-0003 EDN: KLOZRT

2. Buja G.S., Menis R., Valla M.I. Disturbance Torque Estimation in a Sensorless DC Drive // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1995. – Vol. 42, No. 4. – P. 351–357. DOI: 10.1109/41.402473

3. Grignion D., Chen X., Kar N.C., Qian H. Estimation of Load Disturbance Torque for DC Motor Drive Systems under Robustness and Sensitivity Consideration // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Vol. 61, № 2. – P. 930–942. DOI: 10.1109/TIE.2013.2257138

4. Morales R., Somolinos J.A., Sira-Ramirez H. Control of a DC Motor Using Algebraic Derivative Estimation with Real-Time Experiments // ISA Transactions. – 2014. – Vol. 47. – P. 401–417.

5. Sariyildiz E., Ohnishi K. Stability and Robustness of Disturbance Observer Based Motion Control Systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2015. – Vol. 62, No. 1. – P. 414–422. DOI: 10.1109/TIE.2014.2327009

6. Sariyildiz E., Oboe R., Ohnishi K. Disturbance Observer-Based Robust Control and Its Applications: 35th Anniversary Overview // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2020. – Vol. 67, No. 3. – P. 2042–2053. DOI: 10.1109/TIE.2019.2903752 EDN: MQZLRB

7. Sevinç A. A Full Adaptive Observer for DC Servo Motors // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. – 2003. – Vol. 11, No. 2. – P. 117–130.

8. Nair S., Jagadanand G., George S. Torque Estimation using Kalman Filter and Extended Kalman Filter Algorithms for a sensorless Direct Torque Controlled BLDC Motor drive: A Comparative Study // Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2021. – Vol. 16. – P. 2621–2634.

9. Humaidi A.J., Ibraheem I.K. Speed Control of Permanent Magnet DC Motor with Friction and Measurement Noise Using Novel Nonlinear Extended State Observer-Based Anti-Disturbance Control // Energies. – 2019. – Vol. 12, № 9. – 1651 p. DOI: 10.3390/en12091651

10. Casiez G., Roussel N., Vogel D. 1 Euro Filter: A Simple Speed-Based Low-Pass Filter for Noisy Input in Interactive Systems // In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '12). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. – 2012. – P. 2527–2530. DOI: 10.1145/2207676.2208639

11. Coronado-Andrade A., de la Guerra A., Alvarez-Icaza L. Load Torque Observer for BLDC Motors Based on a High-Order Sliding-Mode Differentiator // Machines. – 2023. – Vol. 11, No. 12. – 1065 p. DOI: 10.3390/machines11121065 EDN: OWYQZI

12. Ortega R. New results on parameter estimation via dynamic regressor extension and mixing: Continuous and discrete-time cases / R. Ortega, S. Aranovskiy, A. A. Pyrkin, A. Astolfi, A. A. Bobtsov // IEEE transactions on automatic control. – 2021. – Vol. 66, No. 5. – P. 2265-2272. EDN: FBONVJ

УДК 004.056:004.7

Гусарова Е. В., Кузнецова А. О.
Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РИСКОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОТОКОЛОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАЗВЕРТЫВАНИЯ И ОБНАРУЖЕНИЯ СОСЕДЕЙ В МУЛЬТИ-ВЕНДОРНЫХ КОММУТИРУЕМЫХ СЕТЯХ

Аннотация. В работе выполнен комплексный сравнительный анализ рисков информационной безопасности при эксплуатации протоколов автоматизации развертывания и обнаружения соседних устройств в гетерогенных сетевых инфраструктурах. На лабораторном стенде с коммутаторами Cisco Catalyst 2960 SI, Eltex MES1428 и MikroTik CRS326 исследованы проприетарный Cisco Smart Install, стандартизированный LLDP и вендорозависимый MNDP. Утилитой SIET подтверждена критическая уязвимость CVE-2018-0171 на оборудовании Cisco, позволяющая полностью извлечь конфигурационный файл по TFTP без аутентификации. Научная новизна расширена инструментальным анализом пассивной разведки для Eltex и MikroTik: экспериментально доказано, что LLDP и MNDP транслируют в широковещательный домен избыточные метаданные (версии прошивок, аппаратные платформы, IP-адреса управления, идентификаторы интерфейсов), достаточные для автоматизированного профилирования инфраструктуры. На основе эмпирических данных разработана формализованная матрица политик безопасности плоскости управления, минимизирующая риски компрометации мульти-вендорных сетей.

Ключевые слова: Smart Install, SIET, Cisco Catalyst 2960 SI, Eltex MES1428, MikroTik CRS326, CVE-2018-0171, сетевая безопасность, TFTP, перехват конфигурации, мульти-вендорная сеть, порт 4786, MNDP, LLDP.

Введение

Протоколы автоматизации развертывания и обнаружения соседних устройств канального и прикладного уровней модели OSI являются неотъемлемой частью современных корпоративных сетей. Они автоматизируют инвентаризацию, первичное конфигурирование и построение карт топологии. Однако архитектурные особенности популярных протоколов – проприетарного Cisco Smart Install (SMI), индустриального стандарта LLDP (IEEE 802.1AB) [2] и проприетарного MikroTik Neighbor Discovery Protocol (MNDP) [6] – изначально создавались в расчёте на доверенную внутреннюю среду и полностью лишены встроенных механизмов аутентификации и шифрования передаваемых данных.

В условиях масштабного импортозамещения и перехода на отечественные аппаратные решения (Eltex) [8] и альтернативные платформы (MikroTik) сетевая инфраструктура предприятий приобретает мульти-

вендорный характер. Прямая проекция известных уязвимостей, таких как критическая брешь удалённого выполнения кода и раскрытия данных Cisco Smart Install (CVE-2018-0171) [4], на гетерогенную среду выявляет методологическую проблему. Отсутствие поддержки Smart Install на не-Cisco оборудовании часто ложно интерпретируется администраторами как признак полной защищённости альтернативных платформ, при этом игнорируется, что штатные аналоги (LLDP, MNDP) несут скрытые риски пассивной разведки и раскрытия топологии. Глубокий анализ и инструментальное сопоставление этих рисков определяют научную новизну данного исследования.

Объект – протоколы автоматического развертывания и обнаружения сетевых устройств. **Предмет** – информативные параметры служебного трафика и уязвимости механизмов обмена данными протоколов Smart Install, LLDP и MNDP на плоскости управления коммутаторов Cisco, Eltex и MikroTik.

Цель – сравнительная оценка рисков ИБ и экспериментальное доказательство возможности сбора критически важной архитектурной информации через служебные сетевые протоколы в мульти-вендорной среде для последующего синтеза адаптивной матрицы защитных мер.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Теоретический анализ архитектуры безопасности протоколов Smart Install [1], LLDP [2] и MNDP [6].
2. Развёртывание лабораторного стенда с коммутаторами Cisco Catalyst 2960 SI, Eltex MES1428 и MikroTik CRS326.
3. Инструментальное тестирование уязвимости CVE-2018-0171 [4] с использованием SIET по методологии NIST [3].
4. Экспериментальный перехват и разбор пакетов LLDP и MNDP для фиксации перечня несанкционированно раскрываемых данных [7].

Литературный обзор

Проблематика защищённости плоскости управления в распределённых сетях регулярно поднимается в исследованиях последних лет. Базовые принципы функционирования Smart Install и сопутствующие угрозы неконтролируемой выгрузки оперативной памяти и конфигурационных файлов подробно рассматриваются в бюллетенях безопасности Cisco Systems [5] и работах по практическому анализу защищённости инфраструктур [12]. Инструментарий верификации уязвимостей, в частности SIET, описывается в контексте тестирования на проникновение как средство легитимного аудита [3].

Специфика стандартного протокола LLDP, регламентированного IEEE 802.1AB, задокументирована в работах Parsons G. [2], где отмечается фундаментальная уязвимость структуры TLV (Type-Length-Value) перед пассивным сниффингом трафика. Дополнительные аспекты применения LLDP

для построения карт сети и сопутствующие риски раскрытия топологии рассматриваются в исследованиях Лагутина И.А. [13].

В отечественной практике вопросы безопасного внедрения коммутаторов Eltex в рамках импортозамещения активно изучаются Уйминым А.Г. и Толмачевым И.М. [8], однако их фокус смещён в сторону системного администрирования и производительности, оставляя детальный анализ векторов утечки данных через широковещательные протоколы слабо проработанным. Особенности RouterOS компании MikroTik и протокола MNDP фиксируются преимущественно в прикладных руководствах [6], где риски пассивного съёма информации зачастую недооцениваются.

Методологические основы эксперимента базируются на рекомендациях NIST Special Publication 800-115 [3], регламентирующих порядок тестирования безопасности сетевого оборудования. Нормативная база защитных мер определяется требованиями ГОСТ Р 57580.1-2017 [10] и методическим документом ФСТЭК России [9], устанавливающими базовый состав организационных и технических мер защиты информации. Технические аспекты анализа перехваченного трафика с использованием Wireshark подробно описаны в работе Мешковой Е.В. [7].

Классификация угроз информационной безопасности в корпоративных системах, включая угрозы канального уровня, представлена в исследовании Мухановой А.А., Ревнивых А.В. и Федотова А.М. [14], где обосновывается необходимость комплексной защиты плоскости управления. Дополнительные подходы к противодействию сетевым атакам, включая системы автоматического предотвращения вторжений, анализируются в работах Ширина К.О. [15]. Общие принципы обеспечения безопасности протоколов маршрутизации и управления в сетях с динамической топологией рассматриваются Щербой Е.В., Никоновым В.И. и Литвиновым Г.А. [16], что актуально для мульти-вендорных сред с высокой степенью гетерогенности.

Настоящее исследование призвано закрыть выявленный пробел, увязав воедино деструктивные возможности активных атак (на примере Cisco) и пассивной разведки (на примере Eltex и MikroTik) в рамках единой методологии сравнительного анализа.

Исходная конфигурация коммутатора Cisco Catalyst 2960 SI

Перед началом эксперимента была проведена проверка состояния протокола Smart Install на целевом устройстве с IOS версии 15.0(2)SE. С помощью команды `show vstack config` было установлено, что по умолчанию протокол находится в состоянии `SmartInstall disabled`. Вывод команды:

Switch# show vstack config

Smart Install Configuration:

Role: Client (SmartInstall disabled) Oper Mode: Disabled

Таким образом, в стандартной конфигурации (после заводского сброса) коммутатор не является уязвимым для атаки CVE-2018-0171 [5], что соответствует рекомендациям Cisco по безопасной настройке.

Для целей эксперимента протокол Smart Install был намеренно активирован на целевом устройстве с помощью команд `vstack` и `vstack client`. Это позволило воспроизвести сценарий, в котором администратор по ошибке или незнанию включил уязвимый сервис. Полученные результаты демонстрируют последствия подобной ошибки конфигурирования.

Методология и топология исследования

Эксперимент выполнен методом последовательного подключения («точка-точка») атакующего узла (Kali Linux) к каждому из трёх целевых коммутаторов. Такой подход обеспечивает чистоту измерений, исключая взаимное влияние устройств. При взаимодействии с Cisco Catalyst 2960 SI и Eltex MES1428 использовалась статическая адресация в подсети 192.168.1.0/24. Коммутатор MikroTik CRS326 исследовался в заводской конфигурации с активным DHCP-сервером, выдающим адреса из 192.168.88.0/24, что позволило оценить риски устройства «из коробки».

Топология последовательного подключения представлена на рисунке 1.

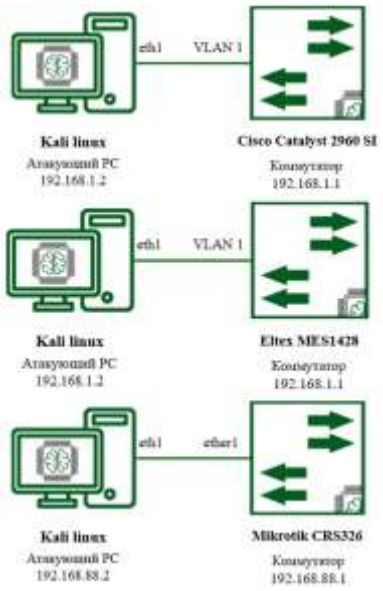


Рисунок 1 – Топология последовательного подключения

Базовая настройка IP-адресов и интерфейсов приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Назначение IP-адресов и интерфейсов

Устройство	**Тип устройства**	**Интерфейс**	**IP-адрес**	**Роль**
Cisco Catalyst 2960 SI	Коммутатор	VLAN1 / Gi0/1	192.168.1.1/24	Целевое устройство №1

Устройство	Тип устройства	Интерфейс	IP-адрес	Роль
Eltex MES1428	Коммутатор	VLAN1 / gi1/0/1	192.168.1.239/24	Целевое устройство №2
MikroTik CRS326	Коммутатор	ether1	192.168.88.1/24	Целевое устройство №3
Kali Linux	Атакующий узел	eth0	192.168.1.2/24 (для Cisco и Eltex); 192.168.88.2/24 (для MikroTik)	Атакующий

Примечание: при подключении к коммутатору MikroTik CRS326, ввиду наличия на нём DHCP-сервера по умолчанию, атакующий узел автоматически получал IP-адрес из пула 192.168.88.0/24. Для обеспечения связности IP-адрес атакующего узла на время эксперимента с MikroTik составлял 192.168.88.2/24.

Методика измерений

Связность проверялась командой ping (не менее 3 пакетов). Оценка рисков включала три метода [3]: (1) активное зондирование – сканирование портов Nmap TCP SYN; (2) активная эксплуатация – внедрение пакетов через SIET с фиксацией получения конфигурационного файла в директории tftp/ после выполнения python2 siet.py -g -i <IP_цели>; (3) пассивный перехват – захват кадров Wireshark [7] с последующим разбором TLV-структур. На устройствах Eltex и MikroTik протокол Smart Install не активировался, так как он не поддерживается [1,6,8]. Перед каждым подключением выполнялся сброс DHCP-аренды и очистка ARP-кэша. Сканирование порта 4786: nmap -p 4786 <IP> -sS. Фиксировались: результат ping, вывод Nmap, вывод SIET в режимах -t и -g, содержимое полученного конфигурационного файла, а также перехваченные кадры LLDP и MNDP с детальным разбором полей.

Экспериментальный анализ уязвимостей и рисков пассивной разведки

Этап 1: Тестирование Cisco Catalyst 2960 SI (Активная эксплуатация)

Начальное состояние протокола Smart Install соответствовало заводскому значению (`SmartInstall disabled`). После принудительной активации режима клиента командами `vstack` и `vstack client` сканирование выявило открытый TCP-порт 4786.

Первым этапом выполнена проверка наличия активного Smart Install Client на целевом устройстве:

python2 siet.py -t -i 192.168.1.1

Утилита подтвердила, что Smart Install Client активен, а устройство идентифицировано как уязвимое (`Device is affected`). Это означает, что порт 4786 открыт и протокол готов к приёму команд от Smart Install Director.

Вторым этапом выполнена атака, направленная на выгрузку конфигурации устройства:

python2 siet.py -g -i 192.168.1.1

В процессе атаки SIET инициировал TFTP-сессию, в результате которой конфигурационный файл `192.168.1.1.conf` был передан на атакующий узел и сохранён в директории `tftp/`. Размер полученного файла составил 1436 байт. Анализ содержимого файла показал, что он содержит полную конфигурацию коммутатора, включая имена VLAN, настройки портов, хэши паролей (Type 5, Type 7) и IP-адреса управления.

Таким образом, подтверждена критическая уязвимость CVE-2018-0171 [4, 5], позволяющая полностью извлечь файл конфигурации по протоколу TFTP без прохождения аутентификации.

Этап 2: Тестирование Eltex MES1428 (Пассивный анализ LLDP)

При подключении утилиты SIET к Eltex MES1428 фиксировалась перманентная ошибка передачи пакета (`Couldn't connect`). Прямое сканирование Nmap показало, что порт 4786 закрыт, так как данное оборудование аппаратно и программно не содержит инструкций Smart Install [8].

Однако запуск сетевого анализатора Wireshark [7] в режиме прослушивания интерфейса (`eth0`) зафиксировал регулярную (раз в 30 секунд) отправку широковещательных кадров на мультикаст-адрес `01:80:c2:00:00:0e` (протокол LLDP) [2]. Инструментальный разбор структуры перехваченных TLV-контейнеров [13] позволил извлечь следующие критические данные без выполнения каких-либо активных запросов:

- Chassis ID (Type 1): MAC-адрес основного управляющего интерфейса коммутатора (`a8:f9:4b:xx:xx:xx`).
- Port ID (Type 2): Локальное системное имя физического интерфейса, в который подключен атакующий (`gigabitethernet 1/0/1`).
- System Name (Type 5): Сетевое имя устройства (`Eltex-MES1428-Core`).
- System Description (Type 6): Полные данные о программно-аппаратной платформе (`MES1428 28-port Managed Switch, SW version 1.1.48.4, HF3`).
- Management Address (Type 8): Реальный IP-адрес интерфейса управления (`192.168.1.239`).

Этап 3: Тестирование MikroTik CRS326 (Пассивный анализ MNDP)

Попытка атаки через SIET на порт 4786 ожидаемо завершилась сбоем подключения ввиду проприетарной природы Smart Install внутри экосистемы Cisco [1]. Сканирование Nmap подтвердило статус порта как `closed`.

Пассивный анализ трафика на интерфейсе выявил плотный поток широковещательных UDP-пакетов, отправляемых устройством на порт 5678 (протокол MNDP) [6]. Структура данного протокола является закрытой, однако парсинг полей в Wireshark позволил атакующей стороне мгновенно деанонимизировать параметры коммутатора. Из сырого дампа были извлечены:

- Идентификатор устройства (Identity): `MikroTik-Main-Gate`.
- Версия операционной системы (Version): `RouterOS v6.49.2 (stable)`.
- Аппаратная платформа (Board Name): `CRS326-24G-2S+`.
- MAC-адрес и интерфейс: `vlan1 (4c:5e:0c:xx:xx:xx)`.
- IP-адрес управления: `192.168.88.1`.

Сводные результаты воспроизведения атак.

Результаты воспроизведения обоих векторов атак сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты тестирования уязвимости SIET

Устройство	**Порт 4786**	**SIET -t**	**SIET -g**	**Размер файла**
Cisco Catalyst 2960 SI	open	is affected	конфигурация получена	1436 байт
Eltex MES1428	closed / отсутствует	couldn’t connected	не получена	–
MikroTik CRS326	closed	couldn’t connected	не получена	–

Анализ перехваченного трафика

В процессе атаки на коммутатор Cisco Catalyst 2960 SI с помощью Wireshark был выполнен анализ сетевого трафика [7]. Установлено, что SIET инициирует TCP-соединение с портом 4786 целевого устройства, после чего происходит передача данных по TFTP на динамический порт атакующего узла (в эксперименте использовался порт 44000). TFTP-трансфер осуществляется без какой-либо аутентификации, что подтверждает критический характер уязвимости CVE-2018-0171 [5].

На устройствах Eltex и MikroTik попытки установить TCP-соединение на порт 4786 не увенчались успехом – целевые узлы либо отклоняли соединение (RST-пакеты), либо не отвечали на SYN-запросы.

Меры защиты

Уязвимость Smart Install заключается в том, что конфигурационная информация передаётся по TFTP в открытом виде без аутентификации, а сам протокол не имеет механизмов проверки подлинности запроса на выгрузку конфигурации [5]. Кроме того, штатные протоколы LLDP и MNDP

раскрывают избыточные метаданные о топологии и версиях ПО [2, 6]. Поэтому защита строится организационными и конфигурационными методами, согласованными с требованиями ГОСТ Р 57580.1-2017 [10] и методического документа ФСТЭК России [9].

Авторы предлагают формализованный комплекс из трёх взаимодополняющих мер, оформленный в виде матрицы политик безопасности.

Первой мерой является отключение протоколов обнаружения и автоматизации на недоверенных интерфейсах, чтобы полностью исключить разведку и несанкционированную выгрузку конфигурации:

- на оборудовании Cisco [1] применяются команды `no vstack` (глобальное отключение Smart Install) и `no cdp enable` / `no lldp transmit` на пограничных интерфейсах;

- на оборудовании Eltex [8] – `no lldp transmit/receive` на пограничном интерфейсе и отключение ненужных сервисов;

- на оборудовании MikroTik CRS326 [6] – ограничение области рассылки MNDP командой `/ip neighbor discovery-settings set discover-interface-list=none` и отключение ненужных сервисов управления через `/ip service disable`.

Второй мерой является применение политики ограничения трафика плоскости управления (Control Plane Policing, CoPP) с порогом 1000 пакетов/с по совокупности служебных протоколов. Согласно рекомендациям Cisco по настройке Control Plane Policing [11], порог в 1000 пакетов/с является эффективным для ограничения служебного трафика, так как типичная интенсивность легитимных протоколов обнаружения не превышает 1–2 пакетов/с.

Третьей мерой является микросегментация широковещательных доменов средствами виртуальных локальных сетей. Поскольку протоколы обнаружения соседних устройств и Smart Install не пересекают границы третьего уровня модели OSI, разделение сети на виртуальные сегменты гарантирует, что шторм служебного трафика из клиентского сегмента не достигнет интерфейсов агрегирующих коммутаторов.

Рекомендации по конфигурированию для каждого вендора

Для Cisco Catalyst 2960 SI [1, 11]:

```
Cisco(config)# no vstack
Cisco(config)# interface range gigabitEthernet 0/1 - 24
Cisco(config-if-range)# no cdp enable
Cisco(config-if-range)# no lldp transmit
Cisco(config-if-range)# no lldp receive
```

Для Eltex MES1428 [8]:

```
Eltex(config)# interface range FastEthernet 1/0/1 - 24
```

Eltex(config-if-range)# lldp transmit disable
Eltex(config-if-range)# lldp receive disable
Для MikroTik CRS326 [6]:
/ip neighbor discovery-settings set discover-interface-list=none
/ip firewall filter add chain=input protocol=udp dst-port=5678 action=drop comment="Блокировка MNDP"

Проверка эффективности защитных мер

Для проверки эффективности предложенного комплекса проведено повторное тестирование атаки SIET с интенсивностью (для Cisco) после применения матрицы политик на всех трёх коммутаторах. Порт 4786 на коммутаторе Cisco закрыт, TFTP-соединение не устанавливается, конфигурационный файл не передаётся. На коммутаторах Eltex и MikroTik, где протокол Smart Install изначально отсутствовал, дополнительная настройка лишь усилила их защищённость, отключив альтернативные протоколы обнаружения (LLDP, MNDP), которые также могут использоваться для пассивной разведки [14]. Таблицы соседей на всех устройствах остаются пустыми или содержат только доверенные записи.

Заключение

В процессе выполнения научно-исследовательской работы осуществлен переход от узконаправленного анализа конкретной уязвимости проприетарного протокола к системному исследованию рисков пассивной разведки в гетерогенной сетевой среде. Экспериментально подтверждено, что коммутатор Cisco Catalyst 2960 SI подвержен риску полной компрометации через CVE-2018-0171 [4, 5], результатом чего является беспрепятственное получение файлов конфигурации.

Главный научный вывод работы заключается в том, что отсутствие поддержки уязвимого протокола Smart Install на альтернативном оборудовании производителей Eltex и MikroTik не означает автоматического достижения состояния защищенности инфраструктуры. Инструментальный анализ трафика доказал, что штатные механизмы LLDP [2] и MNDP [6] выступают в качестве легитимных каналов утечки критически важной информации, предоставляя потенциальному злоумышленнику точные сведения об архитектуре сети, версиях операционных систем и IP-адресах управления.

Разработанный и верифицированный в лабораторных условиях формализованный комплекс защитных мер на базе матрицы политик безопасности позволяет полностью ликвидировать данные векторы атак. Ограничение зон распространения широковещательных метаданных и принудительное отключение сервисов обнаружения соседей на непривилегированных интерфейсах доступа гарантируют устойчивость

мульти-вендорной сети как к активным деструктивным воздействиям, так и к пассивному съему информации [15, 16].

Направления дальнейших исследований лежат в области оценки влияния атак класса Denial of Service (DoS) на процессорные модули коммутаторов при переполнении таблиц через фаззинг LLDP/MNDP пакетов, а также тестирования оборудования других вендоров (D-Link, Huawei, Zyxel) на подверженность аналогичным угрозам пассивной разведки.

Список литературы:

1. Smart Install Configuration Guide [Electronic recourse] // Cisco Systems. – URL: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/lan/smart_install/configuration/guide/smart_install/features.html?ysclid=mr6rbs7rl660799054 (дата обращения: 29.05.2026).

2. IEEE Std 802.1AB-2016. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Station and Media Access Control Connectivity Discovery [Electronic recourse] // IEEE Standard Association. – URL: https://standards.ieee.org/ieee/802.1AB/6047/ (дата обращения: 29.05.2026).

3. Scarfone K., Souppaya M., Cody A., Orebaugh A. NIST Special Publication 800-115: Technical Guide to Information Security Testing and Assessment // National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, 2008. DOI: 10.6028/NIST.SP.800-115

4. CVE-2018-0171 [Electronic recourse] // CVE. org. – URL: https://cve.mitre.org/cgi-bin/cvename.cgi?name=CVE-2018-0171 (дата обращения: 29.05.2026).

5. Cisco IOS and IOS XE Software Smart Install Remote Code Execution Vulnerability [Electronic recourse] // Cisco Systems. – URL: https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/csa/cisco-sa-20180328-smi2.html?ysclid=mr6r5lpj5t429387182 (дата обращения: 29.05.2026).

6. Neighbor Discovery [Electronic recourse] // MikroTik. – URL: https://manual.mikrotik.com/docs/system-information-and-utilities/neighbor-discovery/ (дата обращения: 29.05.2026).

7. Мешкова Е.В. Перехват и анализ сетевого трафика с помощью «Wireshark» // Контентус. – 2016. – № 8 (49). – С. 158–162. EDN: XCOKMN

8. Уймин А.Г., Толмачев И.М. Применение отечественного сетевого оборудования Eltex и EcoRouter в рамках специальности 09.02.06 «Сетевое и системное администрирование». Вопросы импортозамещения и подготовки квалифицированных кадров в сетевом оборудовании // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2025. – № 11 (628). – С. 58–62. EDN: DMHQJU

9. Меры защиты информации в государственных информационных системах: методический документ [Электронный ресурс] // ФСТЭК России. – URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-11-fevralya-2014-g (дата обращения: 29.05.2026).

10. ГОСТ Р 57580.1-2017. Безопасность финансовых (банковских) операций. Защита информации финансовых организаций. Базовый состав организационных и технических мер // М.: Стандартинформ, 2020. – 66 с.

11. Quality of Service Configuration Guide, Cisco IOS XE 17.x [Electronic recourse] // Cisco Systems. – URL: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/routers/ios/config/17-x/qos/b-quality-of-service/m_qos-plcshp-ctrl-pln-plc-0.html?ysclid=mr6qr9bdm5438772584 (дата обращения: 29.05.2026).

12. Вартанян А.А. Угрозы и атаки сетевой безопасности // E-Scio. – 2023. – № 4 (79). – С. 15-20. EDN: EFJSZS

13. Лагутин И.А. Определение топологии с помощью протокола LLDP в сетях Juniper // Перспективы развития информационных технологий. – 2013. – № 16. – С. 66-70.

14. Муханова А.А., Ревнивых А.В., Федотов А.М. Классификация угроз и уязвимостей информационной безопасности в корпоративных системах // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: «Информационные технологии». – 2013. – Т. 11, № 2. – С. 55–72.

15. Ширин К.О. Современные подходы к решению проблемы защиты от сетевых атак «Отказ в обслуживании»: системы автоматического предотвращения вторжений // T-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2011. – Т.5, № 7. – С. 161–163. EDN: OPICFF

16. Щерба Е.В., Никонов В.И., Литвинов Г.А. Обеспечение безопасности протоколов маршрутизации для телекоммуникационных сетей с динамической топологией // Доклады томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2018. – Т. 21, № 3. – С. 19–29. DOI: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-19-29 EDN: YSTPQT

УДК 658.5:004.94

Титов Е. А.
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИНДИКАТОРОВ ПРОИЗВОДСТВА КОРПУСОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОТАЦИИ IDEF0

Аннотация. В статье предлагается методический подход к формализации технологического цикла изготовления корпусных изделий для систем промышленной автоматизации, ориентированный на дальнейшее применение в задачах прогнозирования и управления. На основании анализа отраслевой практики выделено одиннадцать переделов производственной цепочки и идентифицированы два узких места — операции лазерного раскроя и нанесения лакокрасочного покрытия. Функциональное описание процесса построено в нотации IDEF0 в виде контекстной диаграммы и декомпозиции верхнего уровня на восемь блоков, один из которых отвечает за мониторинг индикаторов и формирование оптимизирующих воздействий. Сформирована и структурирована совокупность двадцати технико-экономических индикаторов, объединённых в пять групп. Построен ориентированный граф связей из двадцати пяти вершин, распределённых по трём уровням представления.

Ключевые слова: производственный процесс, IDEF0, технико-экономические индикаторы, топологическая модель, корпусные изделия, промышленная автоматизация, узкие места, ориентированный граф.

Введение

Российский сегмент производства электротехнических оболочек и корпусных изделий для систем АСУ ТП в последние годы стабильно растёт, что во многом связано с реализацией программ импортозамещения и общим направлением на цифровизацию промышленности [1]. Вместе с тем работа предприятий идёт в условиях существенной нестабильности внешней среды: меняется стоимость сырья, преобразуются логистические схемы, обновляется состав комплектующих [2]. В этих условиях актуальной задачей становится формализованное описание производственной цепочки и системы технико-экономических индикаторов, на основе которого впоследствии могут быть построены модели прогнозирования и алгоритмы выработки управляющих решений.

Цель настоящей статьи — представить методический контур такого описания применительно к выпуску корпусных изделий. Решаются три взаимосвязанные задачи: декомпозиция технологической цепочки с указанием лимитирующих переделов; функциональное моделирование процесса в нотации IDEF0; формирование совокупности индикаторов производственной деятельности и построение графа их причинно-следственных связей.

Методическая основа исследования включает положения стандартов функционального моделирования [3] и нормативные документы по системам ключевых показателей эффективности [4], а также методику парных сравнений Саати, применяемую при экспертном взвешивании связей между элементами модели [5].

1. Структура технологического цикла и узкие места

Технологический цикл изготовления корпусной продукции для аппаратуры промышленной автоматизации представляет собой последовательность преобразований листового проката и сопутствующих комплектующих в готовые изделия требуемого качества и исполнения [1]. К типовой номенклатуре выпуска относятся: распределительные шкафы напольного исполнения (1200–2200 мм, степень защиты до IP66), компактные настенные боксы (200–800 мм, IP55–IP69K), пульты управления различной конфигурации, серверные и телекоммуникационные стойки (19″, до 42U), климатические шкафы с встроенным климат-контролем, а также корпуса взрывозащищённого исполнения [6]. Указанная широта типоразмерного ряда — обычно свыше тысячи позиций — задаёт смешанный характер производства («Производство на склад» плюс «Производство под заказ») и обусловливает многокритериальную природу задачи планирования.

На обобщённом уровне технологическая цепочка раскладывается на одиннадцать переделов: входной контроль и складирование сырья; раскрой и резка металла; профилирование заготовок; гибка и формовка; сварочные операции; подготовка поверхности; окрашивание; нанесение уплотняющих контуров; комплектация и сборка; контроль качества; упаковка и отгрузка. Состав основного оборудования и роль каждого передела в задачах оптимизации сведены в таблице 1.

Таблица 1. Декомпозиция технологического цикла с выделением лимитирующих переделов

№	Передел	Оборудование (типовое)	Значение для оптимизации
1	Входной контроль и складирование	Стеллажи, весовые посты	Управление запасами
2	Раскрой и резка металла	Лазерные комплексы, КРП	Узкое место №1: OEE, Ким
3	Профилирование	Профилирующие линии	Время переналадок, такт
4	Гибка и формовка	Листогибочные прессы	Время переналадок, такт
5	Сварочные операции	Сварочные роботы, столы	Квалификация, брак
6	Подготовка поверхности	Линии фосфатирования	Качество покрытия

№	Передел	Оборудование (типовое)	Значение для оптимизации
7	Окрашивание	Покрасочные камеры	Узкое место №2: энергоёмкость
8	Нанесение уплотнения	Дозаторы полиуретана	Время переналадок
9	Комплектация и сборка	Верстаки, пневмоинструмент	Lead Time, НЗП
10	Контроль качества	Стенды, IP-тестеры	FTT, рекламации
11	Упаковка и отгрузка	Паллетировщики, стрейч-машины	OTIF, Lead Time

Анализ загрузки и пропускной способности отдельных переделов, представленный в таблице 1, показывает, что лимитирующими являются два участка — лазерный раскрой (передел 2) и покрасочная линия (передел 7). Именно эти участки определяют общую пропускную способность производственной цепочки и поэтому выбираются в качестве преимущественных объектов управляющих воздействий при последующем построении оптимизационной модели.

2. Функциональное описание процесса в нотации IDEF0

Формализация технологического цикла выполнена средствами методологии SADT в нотации IDEF0 в соответствии с действующим национальным стандартом [3]. Каждый функциональный блок описывается четырьмя группами интерфейсных стрелок: входы (преобразуемые материальные и информационные потоки), управления (нормативные документы и плановые задания), механизмы (используемые ресурсы) и выходы (результаты функционирования). Развитие подобных моделей применительно к задачам промышленной автоматизации подробно рассмотрено в работе [7].

На контекстном уровне (диаграмма A-0) производственный процесс рассматривается как единая функция, преобразующая металлопрокат, комплектующие и заказы клиентов в готовую корпусную продукцию, отчётность и производственные отходы. Управляющими воздействиями являются: производственный план, технологические регламенты и стандарты качества (в первую очередь ГОСТ IEC 62208 [6]). Механизмами выступают оборудование, персонал и информационные системы — ERP, MES, а также разрабатываемое инструментальное средство мониторинга индикаторов.

При декомпозиции контекстной диаграммы выделено восемь функциональных блоков верхнего уровня. Содержательное описание каждого блока, типичный выход и его связь с системой индикаторов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Функциональные блоки верхнего уровня (декомпозиция A0)

Блок	Функция	Выход	Связь с системой индикаторов
A1	Оперативное планирование и оптимизация	Производственная программа, план закупок	Принимает оптимизирующие рекомендации от блока A8
A2	Раскрой и механическая обработка	Заготовки деталей	OEE лазера и КРП, Ким, такт выпуска
A3	Сварочное производство	Сварные узлы	Уровень брака по сварке, FTT
A4	Окрашивание и нанесение уплотнения	Окрашенные корпуса	Энергоёмкость, брак по покрытию
A5	Комплектация и сборка	Собранные корпуса	Lead Time, объём НЗП
A6	Контроль качества и испытания	Годная продукция, акты	FTT, число рекламаций
A7	Упаковка и отгрузка	Отгруженные заказы	Показатель OTIF
A8	Мониторинг индикаторов и формирование воздействий	Рекомендации для A1, оповещения	Замыкает контур обратной связи

Блок A8 «Мониторинг индикаторов и формирование оптимизирующих воздействий» занимает в построенной модели специальное положение: он получает фактические значения индикаторов производства из блоков A2–A7, сопоставляет их с плановыми, инициирует работу прогнозной модели и формирует управляющие сигналы, передаваемые в блок A1 «Оперативное планирование». Тем самым на функциональной диаграмме явно проявляется контур обратной связи, замыкающий процесс управления.

3. Состав и классификация технико-экономических индикаторов

Совокупность индикаторов производственной деятельности формируется на основе принципов сбалансированности, измеримости и оперативности получения. Изучение отраслевой практики и положений ГОСТ Р ИСО 22400-2-2019 [4] позволило выделить двадцать индикаторов, объединённых в пять смысловых групп. Каждому индикатору сопоставлен тип (целевой либо диагностический) и приоритет для последующих задач оптимизации. Структура перечня по группам и приоритетам приведена в таблице 3.

Таблица 3. Структура совокупности технико-экономических индикаторов

Группа	Кол-во	Из них целевых	Целевые индикаторы высокого приоритета
Производительность	4	1	OEE
Качество	4	3	Уровень брака
Затраты	4	3	Себестоимость
Логистика	5	2	OTIF
Финансы	3	3	Рентабельность, объём выпуска
Итого	20	12	6 высокоприоритетных целевых индикаторов

В качестве целевых индикаторов высокого приоритета, по которым в дальнейшем формируются критерии оптимизации, приняты шесть показателей: общая эффективность оборудования (OEE), уровень брака, полная производственная себестоимость единицы продукции, доля заказов, выполненных в срок и в полном объёме (OTIF), рентабельность производства и объём выпуска. Остальные индикаторы рассматриваются как диагностические и предназначены для контроля состояния технологической цепочки.

4. Трёхуровневая топологическая модель связей

Для отображения причинно-следственных связей между внешней средой, регулируемыми параметрами и индикаторами производства предложено представление в виде ориентированного взвешенного графа $G = (V, E, W)$, где V — множество вершин, E — множество дуг, а $W : E \to [-1; +1]$ — функция весов [8]. Формирование графа выполняется в четыре этапа: экспертная идентификация перечня вершин и предполагаемых связей; статистическая проверка значимости связей по ретроспективным данным; экспертное взвешивание оставшихся дуг по методу парных сравнений Саати [5]; визуализация и анализ структуры графа на предмет ключевых хабов и контуров обратной связи.

Вершины графа разделены на четыре функциональные категории, образующие в совокупности трёхуровневую структуру: уровень «вход» (регулируемые параметры и внешние возмущения), уровень «передаточные элементы» (промежуточные концепты), уровень «выход» (целевые индикаторы). Распределение вершин по категориям и состав каждой категории приведены в таблице 4.

Таблица 4. Състав вершин трёхуровневой топологической модели (25 вершин)

Категория	**Кол-во**	**Состав вершин**
Регулируемые параметры (U)	7	Закупки металла; численность персонала; инвестиции в модернизацию; затраты на обучение; режим работы (сменность); затраты на техобслуживание и ремонт; уровень автоматизации
Внешние возмущения (F)	5	Стоимость металлопроката; объём входящих заказов; курс EUR/RUB; сезонный фактор; надёжность поставщиков
Промежуточные концепты (I)	7	Квалификация персонала; загрузка оборудования; время переналадок; уровень НЗП; износ оборудования; запасы материалов; производственная мощность
Целевые индикаторы (Y)	6	OEE; себестоимость; OTIF; уровень брака; рентабельность; объём выпуска

Анализ топологии полученного графа показывает, что наибольшей степенью связности обладает концепт «загрузка оборудования»: он играет роль центрального хаба и одновременно влияет на все шесть целевых индикаторов производства. Второй по значимости является вершина «стоимость металлопроката» с лагированным воздействием на себестоимость и рентабельность.

Веса дуг w_{ij} графа определяются комбинированно: на содержательном уровне — по результатам экспертного парного сравнения значимости связей методом аналитической иерархии [5], на верификационном уровне — по парным коэффициентам корреляции (Пирсона и Спирмена), рассчитанным на ретроспективных данных. Результирующий вес каждой дуги принимает значение из интервала $[-1; +1]$, что позволяет в дальнейшем непосредственно использовать топологическую модель как структурную основу нечёткой когнитивной карты при построении системы прогнозирования и оптимизации.

Заключение

Предложенный методический контур формализации производственного процесса изготовления корпусных изделий для систем промышленной автоматизации включает три согласованные составляющие. Во-первых, декомпозицию технологической цепочки на одиннадцать переделов с явным выделением двух лимитирующих участков — лазерного раскроя и нанесения лакокрасочного покрытия. Во-вторых, функциональную модель в нотации IDEF0, включающую специализированный блок мониторинга индикаторов и формирования управляющих воздействий, который замыкает контур обратной связи. В-третьих, систематизированную совокупность из двадцати технико-

экономических индикаторов, объединённых в пять групп, с выделением шести целевых индикаторов высокого приоритета.

Связи между внешними возмущениями, регулируемыми параметрами и индикаторами производства представлены в форме ориентированного взвешенного графа из двадцати пяти вершин, образующих трёхуровневую структуру. Полученное представление одновременно сохраняет интерпретируемость, удобную для специалистов предприятия, и обладает математической определённостью, необходимой для последующего использования в задачах статистической обработки данных и построения прогнозных моделей. Дальнейшие направления работ связаны с количественной идентификацией весов дуг графа по ретроспективным данным и применением полученной структуры в системе поддержки принятия управленческих решений.

Список литературы:

1. Фатхутдинов, Р. А. Организация производства : учебник / Р. А. Фатхутдинов. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : ИНФРА-М, 2023. — 544 с. — (Высшее образование: Бакалавриат). - ISBN 978-5-16-002832-3. - Текст : электронный. - URL: https://znanium.ru/catalog/product/1901311 (дата обращения: 10.06.2026). – Режим доступа: по подписке.

2. Зайцев Н. Л. Экономика, организация и управление предприятием // НИЦ ИНФРА-М, 2007. - 455 с. ISBN: 5-16-002841-2 EDN: QRKPTH

3.ГОСТ Р 50.1.028-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования // М.: Госстандарт России, 2001. - 42 с.

4.ГОСТ Р ИСО 22400-2-2019. Системы промышленной автоматизации и интеграция. Ключевые технико-экономические показатели (KPIs) для управления производственными операциями. Часть 2. Определения и описания // М.: Стандартинформ, 2019. - 65 с.

5.Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation // McGraw-Hill International Book Company, 1980. - 287 p.

6.ГОСТ IEC 62208-2013. Оболочки для низковольтных комплектных устройств распределения и управления. Общие требования // М.: Стандартинформ, 2014. - 15 с.

7.Маклаков С. В. Моделирование бизнес-процессов с AllFusion PM / С. В. Маклаков. - Изд. 2-е., испр. и доп. // Москва: Диалог-МИФИ, 2008. - 224 с. ISBN: 5-86404-179-3 EDN: QTFYPF

8.Робертс Ф. С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам / Ф. С. Робертс; пер. с англ. А. М. Раппопорта, С. И. Травкина; под ред. А. И. Теймана // М.: Наука, 1986. - 494 с.

УДК 629.7.064

Доулетов И. И., Блинов К. Р.
ООО «НПП «ОРИОН», Санкт-Петербург, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ АКСИАЛЬНО-ПЛУНЖЕРНОГО НАСОСА ПЕРЕМЕННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Аннотация: в данной работе определяются основные технические характеристики гидромеханического регулятора давления аксиально–плунжерного насоса переменной производительности. На основании схемно–конструктивного анализа системы управления авиационных насосов схожего конструктивного исполнения приводятся ключевые геометрические параметры, обеспечивающие работу регулятора давления, рассматривается последовательность его работы. Определены основные технические характеристики: усилие предварительной затяжки пружины и давление управления, поступающего на сервопоршень.

Ключевые слова: Аксиально–плунжерный насос переменной производительности, гидромеханический регулятор давления, основные технические характеристики, схемно–конструктивный анализ и расчет, PID – регулятор.

Введение

Аксиально–плунжерные насосы переменной производительности применяются в гидравлических системах в различных отраслях промышленности, в большой номенклатуре высокотехнологичного оборудования с высокой добавленной стоимостью.

За счет своего технического совершенства аксиально–плунжерные насосы применяются и в аэрокосмической технике.

Система управления аэрокосмической техники все время совершенствуется, внедряются пропорционально–интегрально–дифференцирующие контуры управления на базе PID – регуляторов, мехатронные устройства, а также устройства с искусственным интеллектом [1–2].

Вместе с тем, аэрокосмическая промышленность остается достаточно консервативной в части применения гидромеханических устройств в гидравлической системе управления изделиями, надежность которых проверена эксплуатацией [3].

Одним из таких гидромеханических устройств является регулятор давления аксиально–плунжерного насоса переменной производительности.

Регуляторы давления бывают гидромеханическими или с внешним электромагнитным управлением.

В отличие от регуляторов давления с электромагнитным управлением, автоматические гидромеханические регуляторы обеспечивают строго заданное значение давление в системе управления насосом, которое остается постоянным во время работы [4].

Схемно–конструктивный анализ

Рассмотрим схему гидромеханической системы управления следующих авиационных насосов, которые имеют общий конструктивный облик (рис. 1):

а) Зарубежные разработчики и изготовители:

– НП40, НП130, НП130–2 (Разработчик ГП «ХАКБ» [URL: http://www.khadb.kh.ua/], изготовитель – ПАО «Волчанский агрегатный завод» [URL: http://www.vza.com.ua/] (дата обращения: 20.06.2026)).

б) Отечественные разработчики и изготовители:

– НП1.26А, НП1.26К (Разработчик и изготовитель АО «МПО им. И. Румянцева» [URL: https://www.mporum.tilda.ws/] (дата обращения: 20.06.2026));

– НМР16D (Разработчик и изготовитель АО «УАП «Гидравлика» [URL: http://www.gidravlika–ufa.ru/] (дата обращения: 20.06.2026)).

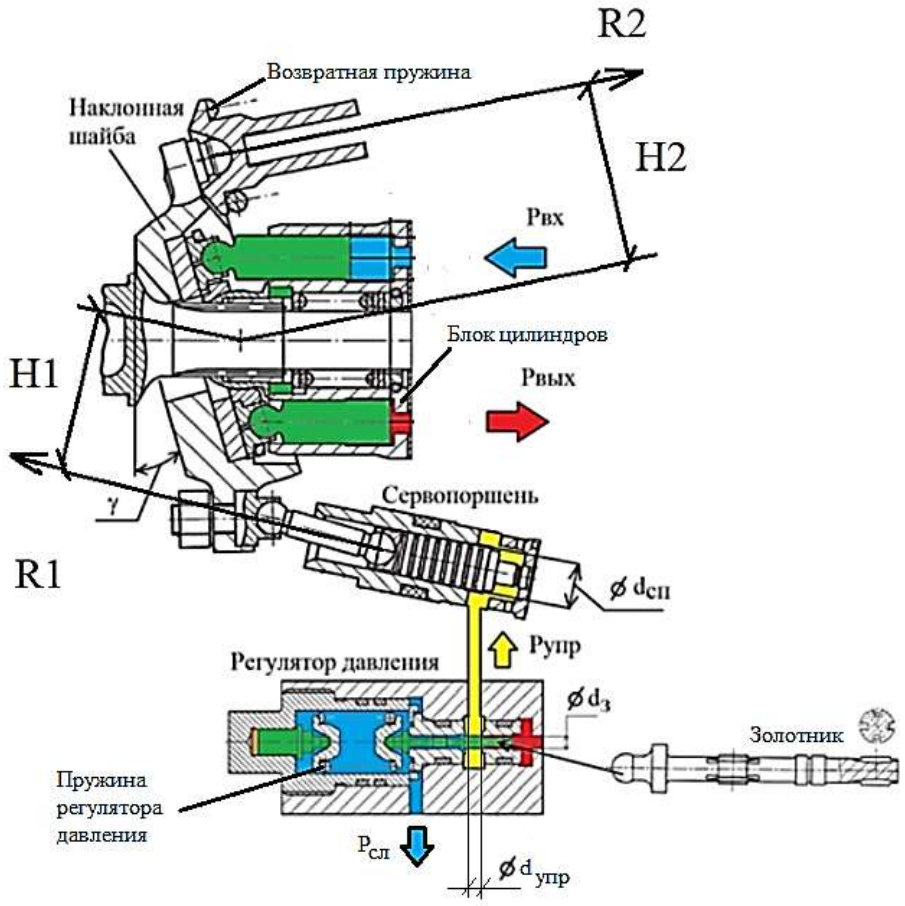


Рисунок 1 – Объединенная схема системы управления аксиально–плунжерным авиационным насосом переменной производительности

где: $d_з$ – диаметр золотника регулятора давления, мм;

$d_{сп}$ – диаметр сервопоршня привода управления рабочим объемом насоса, мм;

$d_{уп}$ – диаметр канала управления, мм;

$P_{вх}$ – давление на входе в качающий блок (блок цилиндров) насоса, кгс/см^2;

$P_{вых}$ – давление на выходе из качающего блока (блока цилиндров) насоса, кгс/см^2;

$P_{сл}$ – давление в сливной полости насоса, кгс/см^2;

R1 – сила, действующее на сервопоршень, Н;

R2 – сила, действующее на возвратную пружину, Н;

H1, H2 – плечи, на которых действуют силы, мм;

 – угол установки наклонной шайбы (люльки), град.

Регулятор давления по схеме, представленной на рисунке 1, работает в следующей последовательности [5]:

– насосный блок обеспечивает подачу рабочей жидкости к потребителю с заданной производительностью;

– при перекрытии канала подачи рабочей жидкости из насоса возникает перепад давления на нагрузке (дроссель, распределитель, кран и т.п.), в результате чего, давление на выходе из насоса растет;

– когда давление на выходе из насоса превышает величину настройки предварительной затяжки пружины регулятора давления, то золотник регулятора давления смещается влево (рис. 1);

– поясок хвостовика золотника имеет продольные канавки, через которые рабочая жидкость поступает на центральный поясок золотника, создавая тем самым осевое усилие на золотнике и поступление рабочей жидкости к сервопоршню;

– на сервопоршне возникает перепад давления между давлением внутри корпуса насоса и давлением в канале управления сервопоршнем;

– сила, которая возникает на сервопоршне, перемещает наклонную шайбу (люльку) на минимальный угол установки, преодолевая усилие затяжки возвратной пружины, вследствие чего происходит регулирование рабочего объема насоса;

– при снижении давления в канале нагнетания насоса золотник регулятора давления перемещается вправо (рис. 1), при этом давление управления в камере сервопоршня падает, поскольку рабочая жидкость перетекает в сливной коллектор через крайний левый поясок золотника регулятора давления (имеет продольные канавки);

– возвратная пружина обеспечивает установку наклонной шайбы (люльки) в положение, которое соответствует максимальной

производительности насоса, на этом цикл работы регулятора давления заканчивается.

Расчет технических характеристик регулятора давления

Расчет гидромеханического регулятора давления необходимо начинать с определения усилия предварительной затяжки пружины, для чего используется следующая зависимость:

$$R_{\text{пр}} = P_0 \frac{\pi \cdot d_з^2}{4}, \text{ Н, (1)}$$

где P_0 – давление нулевой подачи насоса, кгс/см^2.

Усилие предварительной затяжки пружины регулятора давления из уравнения (1) позволяет перейти к подбору уже существующих пружин согласно отраслевой нормативной документации, либо определению их геометрических характеристик.

Далее необходимо составить уравнение неразрывности объемного расхода в камерах регулятора давления [6]:

$$\mu \cdot \frac{\pi \cdot d_з^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{P_0 - P_{\text{упр}}} = \mu \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{упр}}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{P_{\text{упр}} - P_{\text{сл}}}, \text{ (2)}$$

где □ – коэффициент расхода;

□ – плотность рабочей жидкости, кг/м^3.

Уравнение (2) позволяет определить давление управления, которое поступает на сервопоршень:

$$P_{\text{упр}} = \frac{\frac{d_з^4}{d_{\text{упр}}^4} \cdot P_0 + P_{\text{сл}}}{1 + \frac{d_з^4}{d_{\text{упр}}^4}}, \text{ кгс/см}^2, \text{ (3)}$$

В свою очередь, давление управления из уравнения (3) используется для определения геометрических характеристик сервопоршня и определения усилия предварительной затяжки возвратной пружины.

Заключение

Проведен схемно–конструктивный анализ авиационных объемных гидромашин; расчет системы управления объемным расходом аксиально–плунжерного насоса, снаряженного гидромеханическим регулятором давления. По результатам анализа представлены основные зависимости для определения технических характеристик гидромеханического регулятора давления, в частности усилие предварительной затяжки пружины и давление управления, поступающего на сервопоршень.

Список литературы:

1. Верещиков Д.В. Имитационная simulink-модель динамики продольного движения самолета / Д.В. Верещиков, И.А. Федоркевич // Воздушно-космические силы. Теория и практика. - 2021. - № 17. - С. 128-138. EDN: FMIILH

2. Train virtual, fight easy [Электронный ресурс] // Royal aeronautical society. – URL: https://www.aerosociety.com/news/train-virtual-fight-easy/ (дата обращения: 20.06.2026).

3. Мышкин Л.В. Прогнозирование развития авиационной техники: теория и практика. / Л.В. Мышкин // М.: Физматилит, 2006. – 304 с.

4. Шумилов И. С. Системы управления рулями самолетов: учебное пособие / И. С. Шумилов // М.: МГТУ им. Баумана, 2009. – 470 с.

5. Орлов Ю.М. Авиационные объемные гидромашины с золотниковым распределением / Ю.М. Орлов; под ред. Н.Г. Важениной // Пермь: Перм. Политехн. Ин–т, 1993. – 251 с.

6. Башта Т.М. Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем / Т.М. Башта; под ред. С.И. Булатова // М.: Машиностроение, 1974. – 606 с.

УДК 628.98:621.311.1

Бабкин И. М., Петухов С. В., Кришьянис М. В., Хвиюзов М. А.
Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск, Россия

УДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация: в статье приводится применение метода удельной мощности для предварительного расчета электрических нагрузок промышленных предприятий. Предлагается методика расчета удельной мощности с учетом световой отдачи светодиодных источников освещения. По полученным результатам определяется установочная мощность. Проведен пример расчета по новой методике и даны рекомендации для дальнейших разработок.

Ключевые слова: электрическое освещение, системы электроснабжения, удельная мощность, светодиодные светильники, световая отдача, промышленные предприятия.

Метод удельной мощности применяется для расчета электрических нагрузок, приходящихся на долю электрического освещения в системах электроснабжения промышленных предприятий [1, с. 5].

Удельная мощность, ($P_{уд}$, Вт/м^2) – это отношение суммарной установленной активной мощности светильников к освещаемой поверхности [2, с 264.]. Она определяется по выражению:

$$p_{уд} = P_{уст}/S, \quad (1)$$

где $P_{уст}$ – суммарная установленная мощность всех светильников, Вт; S – эффективная площадь освещаемой поверхности, м^2.

Установочную мощность, необходимую для дальнейших расчетов систем электроснабжения, можно определить из выражения (1):

$$P_{уст} = p_{уд} \cdot S. \quad (2)$$

Метод удельной мощности эффективен на начальных этапах разработки систем электроснабжения и позволяет определить предварительную осветительную нагрузку предприятия без проведения сложного полного светотехнического расчета.

Чем выше данный показатель, тем больше электрической энергии приходится на 1 м^2 эффективной площади. Завышенная удельная мощность может привести к перерасходу материалов, например, неоправданно

большему сечению проводников, или неправильному выбору аппаратов защиты, например, автоматических выключателей.

Современные промышленные предприятия направлены на повышение энергоэффективности и оптимизацию систем электроснабжения, в том числе за счет перехода на источники искусственного освещения с высокой световой отдачей H (лм/Вт), определяемой как световой поток источника света $Ф$ (лм) соотносится к его активной мощности P (Вт), как показано в выражении 3 [3, с. 5].

$$H=Ф/P \quad (3)$$

Большинство современных светодиодных светильников имеет световую отдачу от 100…150 лм/Вт, а [4, с. 5] регламентирует минимальную световую отдачу 90…100 лм/Вт в зависимости от мощности и типа светильника.

Численные значения удельной мощности, которые приводятся в источниках литературы для промышленных предприятий, не всегда учитывают современное состояние технологий и стремительное развитие светодиодных источников освещения, световая отдача которых достигает до 200 лм/ Вт.

Максимально допустимую удельную мощность можно определить по таблицам 7.2 или 7.4 [5, с 11, 12]. Для этого необходимо знать тип помещения, индекс и среднюю или нормированную освещённость.

Если типов помещения всего два – промышленное или бытовое, то с определением индекса помещения и средней освещенности могут возникнуть сложности.

Так, нормированная освещенность определяется в зависимости в функции признаков работы, например, наименьший или эквивалентный размер объекта различения, разряд зрительной работы, контраст объекта с фоном, характеристика фона и другие [6, с. 16]. Чтобы выбрать среднюю освещенность, подходящую под совокупность признаков, необходимо проделать комплексное измерение, или воспользоваться действующим ГОСТ Р для определенного вида работ внутри зданий [7, с. 4].

Индекс i, учитывающий форму помещения, определяют по упрощенным таблицам [8, с. 38] или формуле (4):

$$i=(A\cdot B)/(h(A+B)), \quad (4)$$

где A и B – длина и ширина помещения, м; h – расчетная высота, м.

Расчетная высота h, м, зависит от высоты помещения H, м, высоты установки светильника h_c, м, и высоты рабочей поверхности h_p и определяется по выражению (5):

$$h=H - h_р - h_с, \quad (5)$$

На начальных этапах расчета высота установки светильников и рабочей поверхности не всегда известна. Данные значения для предварительных расчетов можно задать, но они могут привести к изменению расчетной высоты и, следовательно, к ошибкам определения индекса помещения и удельной мощности.

Следует также учесть, что численные значения удельной мощности в указанных таблицах являются максимально допустимыми. Это также приводит к ошибочным расчетам.

Самый простой метод расчета удельной мощности приведен в работе [9, с. 81] для основных промышленных объектов, но не учитывает световую отдачу осветительных приборов.

Чтобы учесть изменение удельной мощности в зависимости от световой отдачи светодиодных ламп авторы предлагают следующую методику:

1) На основании таблицы Б1 [9, с. 81] выбирают наименование цеха.

2) Рассчитывают требуемую удельную мощность с учетом световой отдачи осветительных приборов. Для данных расчетов можно воспользоваться формулой 6 или упрощенными данными, приведенными в табл. 1 для некоторых промышленных объектов.

$$p_{уд}=p_{уд.табл}\cdot H_{табл})/H_{св} , \quad (6)$$

где $H_{табл}$ – табличное значение световой отдачи, лм/Вт, для которых составлена таблица Б1; $H_{св}$ – световая отдача светильников, которые предполагается установить в системе электрического освещения.

Так как светодиодные светильники должны обладать максимальной энергоэффективностью, то их минимальная световая отдача согласно [4, с. 5] должна быть 90…115 лм/Вт, табл. 1. составлена с условием, что при расчете удельной мощности минимальная световая отдача в таблице Б1 [9, с. 81] принята 90 лм/Вт.

Таблица 1. Удельные мощности нагрузок освещения производственных зданий с учетом световой отдачи светильников

Наименование цеха, корпуса	**Световая отдача, лм/Вт**						
	90	**100**	**120**	**140**	**160**	**180**	**200**
1) Литейные, плавильные, механические, сборочные, сварочные, термические металлопрокатные, деревообрабатывающие, модельные, насосные, компрессорные, котельные, блоки вспомогательных цехов	8…10	7,2…9	6…7,5	5,1…6,4	4,5…5,6	4…5	3,6…4,5
2) Инструментальные	10…12	9…11	7,5…9	6,4…7,7	5,7…6,8	5…6	4,5…5,4
3)Заводоуправление, инженерные корпуса, лаборатории	6…7	5,4…6,3	4,5…5,25	3,9…4,5	3,4…3,9	3…3,5	2,7…3,2
4) Склады	2,5…4	2,3…3,6	1,9…3	1,6…2,6	1,4…2,25	1,25…2	1,13…1,8
5) Наружное освещение	0,25…0,5	0,23…0,45	0,19…0,38	0,16…0,32	0,14…0,28	0,13…0,25	0,11…0,23

Источник: анализ автора.

Например, в сборочном цехе промышленного предприятия размерами помещения цеха длина А = 60 м, ширина В = 40 м, требуется определить расчетную активную нагрузку электрического освещения, выполненного светодиодными светильниками. Предполагается, что светильники будут иметь световую отдачу H = 120 лм/Вт.

Расчетная площадь S = A·B; S = 60·40=2400 м^2.

Максимальную удельную мощность определяем по табл. 1:

$p_{уд}$ = 6…7,5 Вт/м^2, принимаем $p_{уд}$ = 6 Вт/м^2

Расчетная активная нагрузка по выражению (1) составит:

$P_{уст} = 6 \cdot 2400 \cdot 10^{-3} = 14{,}4$ кВт.

По данной работе можно сделать следующие выводы:

1) Приведенная методика упрощает расчеты при отсутствии достаточных характеристик объекта. Для расчетов по данной методике необходимо знать назначение корпуса или цеха, его площадь и световую отдачу светильников.

2) Для общего равномерного освещения предложена формула пересчета удельной мощности с учетом светового потока светильников, позволяющая

более точно оценить осветительную нагрузку на системы электроснабжения и выбрать необходимые технико-экономические решения.

3) Методика подходит для простых предварительных расчетов и не учитывает такие факторы, как средняя освещенность, индекс помещения и другие характеристики.

Список литературы:

1. Козловская В.Б., Радкевич В.Н. Определение расхода электроэнергии на освещение промышленных предприятий // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2008. – № 4. – с. 5-11. – EDN: SGXCOB

2. Левзикова А. Э. Проверка точности расчета электрического освещения методом удельной мощности / А. Э. Левзикова // Современные проблемы машиноведения: материалы XII Междунар. науч.- техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого»; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 264-266.

3. Афонин К.Н., Андреева М.В., Солдаткин В.С., Туев В.И., Иванов А.А. Повышение световой отдачи светодиодов белого цвета свечения путем изменения химического состава люминофорных композиций / К.Н. Афонин, М.В. Андреева, В.С. Солдаткин, В.И. Туев, А.А. Иванов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2023. – Т. 66, №9. – С. 741-749. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-741-749 EDN: PHKEKP

4. Правительство Российской Федерации. Постановление от 24 декабря 2020 года N2255 об утверждении требований к осветительным устройствам и электрическим лампам, используемым в цепях переменного тока с целью электрического освещения // СПС Гарант.

5. Изменение № 2 к СП 52.133320.2016 «СНИП 23-05-95* Естественное и искусственное освещение» // Минстрой России. – 2021.

6. СП 52.13330.2016. Свод правил. Естественное и искусственное освещение // Минстрой России. – 2017.

7. ГОСТ Р 55710-2013. Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений // Стандартинформ, 2016. – 19 с.

8. Методическое пособие. Проектирование искусственного освещения общественных и жилых зданий // Минстрой России, 2016. – 141 с.

9. Балашов О.П. Системы электроснабжения и проектирование электрических сетей: Учебно-методическое пособие к курсовому проекту для студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника», всех форм обучения // Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2022. – 99 с.

УДК 69.07

Солехзода Сабринахон
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИБРИДНЫХ ДЕРЕВО-ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СИСТЕМ В СЕЙСМООПАСНЫХ РАЙОНАХ

Аннотация. Предметом исследования является применение гибридных конструктивных систем, сочетающих железобетонное ядро жесткости и каркас из инженерной древесины LVL, в сейсмоопасных районах. Объект исследования - динамическая работа многоэтажного здания при сейсмическом воздействии. В исследовании применялись методы сравнительного анализа нормативных требований, обзора научной литературы и численного моделирования в ПК SCAD. Рассмотрены физико-механические свойства цельной древесины, клееной древесины, CLT и LVL. В результате установлено, что система «ЖБ-ядро + LVL-каркас» обеспечивает более благоприятный уровень перемещений при сохранении малой массы и повышенной ремонтопригодности конструкций.
Ключевые слова: сейсмостойкость, LVL, гибридная система, железобетонное ядро, деревянный каркас, динамический расчет, SCAD.

Актуальность исследования

Современное строительство в сейсмоопасных регионах требует применения конструкционных материалов и систем, обеспечивающих не только достаточную несущую способность, но и благоприятное динамическое поведение здания при воздействии землетрясений. К ключевым факторам эффективности конструктивного решения относятся масса здания, жесткость и пластичность несущей системы, способность к рассеянию энергии, предсказуемость механических характеристик материалов и ремонтопригодность конструкций после сейсмических событий.

Традиционно в сейсмостойком строительстве широко применяются железобетон и сталь. Железобетон эффективен для формирования ядер жесткости и диафрагм, однако его значительная масса увеличивает инерционные сейсмические силы. Стальные конструкции обладают высокой пластичностью, но требуют защиты от коррозии и огневого воздействия. В связи с этим в мировой и отечественной практике возрастает интерес к инженерной древесине - клееной древесине, перекрестно-клееным панелям CLT и древесине из ламинированного шпона LVL [2, с. 458-461; 3, с. 75-82; 5].

Цельная древесина характеризуется выраженной природной неоднородностью (рис. 1), что ограничивает точность прогнозирования работы элементов и узлов при циклических нагрузках.

Рис. 1. Схематичное представление конструкций из цельной древесины
Источник: разработано автором на основе [2; 5].

Обзор литературы по теме

Анализ современных публикаций показывает, что развитие многоэтажного деревянного строительства связано прежде всего с применением индустриальных материалов на основе древесины и с уточнением нормативной базы. Отечественные исследования обращают внимание на необходимость актуализации нормативно-технической документации, поскольку действующие документы не полностью раскрывают работу современных изделий из древесины, в том числе CLT и LVL, в составе сложных конструктивных систем [1, с. 1055-1077].

CLT рассматривается как эффективный панельный материал для стен, перекрытий и диафрагм жесткости. По данным российских исследований, данная технология перспективна для многоэтажного строительства благодаря заводской готовности элементов, высокой скорости монтажа и сниженной массе конструкций [3, с. 75-82]. Структура CLT, показанная на рис. 2, обеспечивает работу панели в нескольких направлениях, что особенно важно для дисковых и стеновых элементов.

Рис. 2. Схема перекрестно-клееной древесины CLT
Источник: разработано автором на основе [3].

LVL отличается преимущественно однонаправленной ориентацией слоев шпона (рис. 3), что повышает эффективность материала в балках, ригелях и колоннах. Отечественные работы рассматривают опыт применения LVL-бруса в несущих конструкциях, влияние угла наклона волокон,

длительную прочность и особенности работы материала при смятии [4; 5; 6; 7, с. 49-53]. Зарубежные исследования также подтверждают высокие показатели прочности и жесткости LVL, возможности экспериментального и численного анализа LVL-панелей, а также методы усиления LVL-элементов композитными материалами [10; 11; 15].

Рис. 3. Схема структуры элемента LVL
Источник: разработано автором на основе [5; 15].

Отдельное направление исследований связано с оценкой динамических характеристик и мониторингом состояния инженерной древесины. В работах по свободным колебаниям LVL-плит и акустико-эмиссионному контролю показана значимость учета динамических параметров и повреждаемости материала [9; 13]. Для гибридных и сейсмостойких систем особый интерес представляют исследования wood-concrete hybrid systems и CLT shear wall systems, где анализируются сейсмическая реакция, потери и восстановительная способность зданий [12; 14; 16].

Проблема исследования

Несмотря на развитие инженерной древесины, в практике проектирования сохраняется проблема выбора рационального материала для деревянной части гибридного здания. Цельная древесина имеет разброс свойств, CLT наиболее эффективна как панельный материал, а LVL рациональнее использовать в линейных элементах каркаса. Поэтому требуется сопоставить работу вариантов «ЖБ-ядро + деревянная несущая система» при одинаковой расчетной схеме здания.

Научная проблема заключается в оценке того, может ли использование LVL в каркасной части гибридной системы обеспечить снижение перемещений при сейсмическом воздействии по сравнению с цельной древесиной и CLT. При этом необходимо учитывать не только расчетные показатели, но и конструктивные преимущества материала: однородность, предсказуемость работы, возможность заводского изготовления и повышения ремонтопригодности узлов.

Материалы и методы

В исследовании применен сравнительный подход, основанный на анализе физико-механических свойств древесных конструкционных материалов и численном моделировании 11-этажного здания со смешанной конструктивной схемой «железобетонное ядро жесткости + деревянный каркас». Оценка выполнялась с учетом требований СП 14.13330, СП 20.13330 и СП 64.13330. Для расчета использовался ПК SCAD.

Для сопоставления материалов использованы показатели плотности, прочности при изгибе, модуля упругости, прочности при растяжении и сжатии вдоль волокон, прочности при сжатии поперек волокон, прочности при скалывании и модуля сдвига. Данные приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические свойства деревянных конструкций

Показатель	Цельная древесина (класс С24)	Клееная древесина (К24)	LVL (К35)	Нормативный источник
Плотность, кг/м³	420	430	450	СП 64, прил. Г
Прочность при изгибе, МПа	24	24	35	СП 64, табл. В.2-В.4
Модуль упругости при изгибе, ГПа (средний)	11,0	12,6	14,7	СП 64, табл. В.2-В.4
Модуль упругости при изгибе, ГПа (нормативный)	9,4	10,2	11,9	СП 64, табл. В.2-В.4
Прочность при растяжении вдоль волокон, МПа	16,5	19,5	34	СП 64, табл. В.2-В.4
Прочность при сжатии вдоль волокон, МПа	24	26,5	32	СП 64, табл. В.2-В.4
Прочность при сжатии поперек волокон, МПа	2,7	3,0	5,6	СП 64, табл. В.2-В.4
Прочность при скалывании вдоль волокон, МПа	2,76	3,8	4,7	СП 64, табл. В.2-В.4
Модуль сдвига, ГПа (средний)	0,72	0,78	0,91	СП 64, табл. В.2-В.4

Источник: составлено автором с учетом СП 64.13330.2017 и данных [5; 15].

Анализ табл. 1 показывает, что LVL обладает наиболее высокими показателями прочности и жесткости при сопоставимой плотности материала. Это позволяет использовать его в несущих элементах каркасных систем без существенного увеличения инерционных сейсмических нагрузок.

Результаты численного моделирования

В рамках численного исследования в ПК SCAD выполнено моделирование 11-этажного здания со смешанной конструктивной схемой: жесткое ядро из железобетонных конструкций и несущая система из деревянных элементов. Для оценки влияния типа древесного материала на динамическую реакцию здания рассмотрены три варианта деревянной части

конструкции: LVL, CLT и цельная древесина. Во всех вариантах изменялись только характеристики древесного материала, а геометрия модели, схема ядра и расчетные воздействия принимались одинаковыми.

По результатам расчета для схемы «ЖБ-ядро + LVL» получен период собственных колебаний T = 0,81 с, при этом максимальное суммарное перемещение составило 85,22 мм. Для схемы «ЖБ-ядро + цельная древесина» период также составил T = 0,81 с, а максимальное суммарное перемещение - 87,47 мм. Для схемы «ЖБ-ядро + CLT» период увеличился до T = 0,92 с, а максимальное суммарное перемещение составило 89,55 мм.

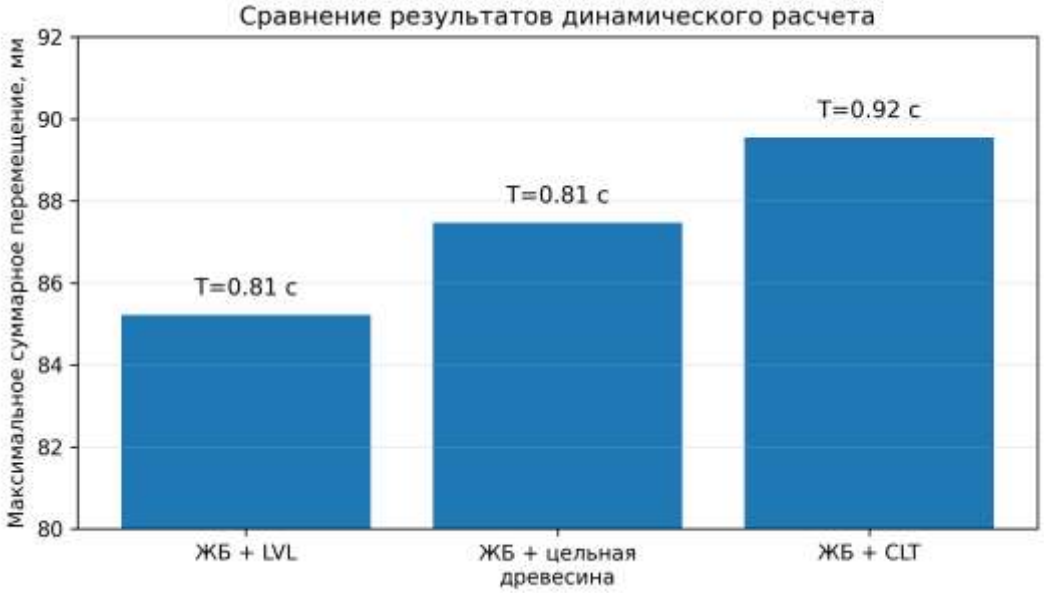


Рис. 4. Сравнение результатов динамического расчета для трех вариантов деревянной части здания

Источник: разработано автором по результатам численного моделирования.

Как видно из рис. 4, вариант с LVL характеризуется наименьшими перемещениями по сравнению с цельной древесиной и CLT. Следовательно, при одинаковом уровне сейсмического воздействия и неизменной конструктивной схеме применение LVL в системе с железобетонным ядром обеспечивает более благоприятный уровень перемещений.

Фрагмент расчетной модели, использованной для оценки перемещений, представлен на рис. 5.

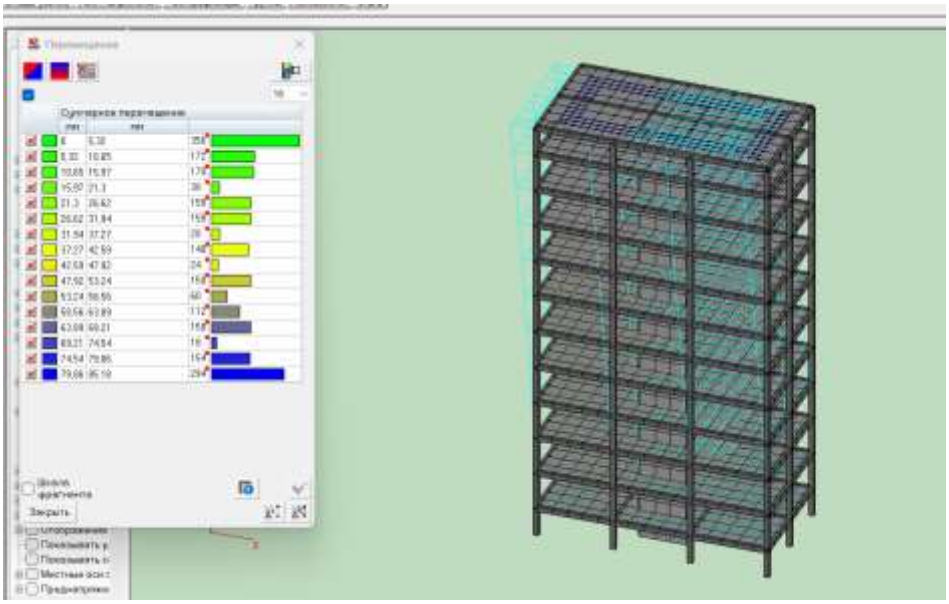


Рис. 5. Фрагмент расчетной модели «ЖБ-ядро + LVL» в ПК SCAD
Источник: разработано автором в ПК SCAD.

Обсуждение результатов исследования

Полученные результаты согласуются с общими выводами исследований по инженерной древесине: снижение массы и повышение однородности материала благоприятно влияют на работу несущей системы при динамических воздействиях. LVL не заменяет железобетонное ядро, а дополняет его в гибридной схеме: железобетон воспринимает основные горизонтальные воздействия и обеспечивает пространственную жесткость, а LVL-каркас формирует легкую и технологичную гравитационную систему.

В сравнении с CLT материал LVL рациональнее для линейных элементов - балок, колонн и ригелей. CLT сохраняет значение как панельный материал для стен, перекрытий и диафрагм, однако в рассматриваемой каркасной схеме LVL показал более благоприятные расчетные перемещения. Для дальнейшего развития таких систем необходимо уточнять параметры узловых соединений, длительной прочности и поведения клеевых соединений при циклических и температурно-влажностных воздействиях [6; 8].

Результаты и выводы

Проведенный анализ показывает, что LVL является наиболее предпочтительным древесным материалом для применения в каркасных элементах гибридных систем в сейсмоопасных районах. По сравнению с цельной древесиной он обладает более стабильными механическими характеристиками, меньшим влиянием природных дефектов и более высокой прогнозируемостью поведения при циклических нагрузках.

Численное моделирование 11-этажного здания в ПК SCAD подтвердило, что система «ЖБ-ядро + LVL-каркас» при сейсмическом воздействии 7 баллов

обеспечивает наименьшее максимальное суммарное перемещение среди рассмотренных вариантов: 85,22 мм против 87,47 мм для цельной древесины и 89,55 мм для CLT. Это позволяет рассматривать LVL как эффективный материал для снижения деформативности гибридной системы.

Таким образом, гибридная система с железобетонным ядром и LVL-каркасом представляет собой конструктивно обоснованное решение для строительства в сейсмоопасных районах. Она обеспечивает рациональное разделение функций между подсистемами: железобетонное ядро отвечает за пространственную жесткость и восприятие горизонтальных нагрузок, а LVL-каркас снижает массу здания и повышает предсказуемость работы элементов.

Список литературы:

1. Агафонов С.А., Волкодав В.А., Волкодав И.А., Титова И.Д. Актуальные направления развития отечественной нормативно-технической документации в области строительства из древесины с учетом зарубежного опыта // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 7. – С. 1055-1077. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1055-1077 EDN: ZFJQPU

2. Бойтемирова И.Н., Паутова Е.П., Артамонова Е.А. Многоэтажное деревянное строительство // Россия: тенденции и перспективы развития. – 2021. – С. 458-461. EDN: IIIWBX

3. Дворцова А.С., Ушаков А.Ю. Перспектива применения CLT-панелей в многоэтажном строительстве // Строительство: наука и образование. – 2023. – Т. 13, № 4. – С. 75-82. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.5 EDN: BHTSND

4. Корольков Д.И., Черных А.Г., Савин С.Н., Коваль П.С., Пухаренко Ю.В., Данилов Е.В. Влияние угла наклона волокон на прочность и срок службы LVL-конструкции // Вестник Евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 5. EDN: AKMHET

5. Малышкин А.П., Максимова О.М. Отечественный опыт применения LVL-бруса в несущих конструкциях // Вестник Евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 5. EDN: NNZPNG

6. Черных А.Г., Глухих В.Н., Коваль П.С., Данилов Е.В., Корольков Д.И., Трунина Ю.В. Сравнительный анализ результатов определения длительной прочности древесины и LVL ускоренным методом при сжатии вдоль волокон // Вестник Евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 6. EDN: GQUYJS

7. Черных А.Г., Хохрин Р.В., Данилов Е.В., Коваль П.С. Исследование прочности LVL при смятии цилиндрическим и треугольным штампами с учетом изменения влажности // Жилищное строительство. – 2023. – № 1-2. – С. 49-53. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-1-2-49-53 EDN: FQYPPX

8. Черных А.Г., Казакевич Т.Н., Миронова С.И., Данилов Е.В., Коваль П.С. Методика испытаний на стойкость и длительную прочность клеевых соединений деревянных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 3. – С. 4-9. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.03.04-09 EDN: IQKUMT

9. Abramowicz M., Chybiński M., Polus Ł., Wróblewski T. Free Vibrations of Sustainable Laminated Veneer Lumber Slabs // Sustainability. – 2024. – Vol. 16, No. 1. – 166 p. DOI: 10.3390/su16010166 EDN: XYSMKE

10. Bakalarz M.M., Kossakowski P.G. Application of Transformed Cross-Section Method for Analytical Analysis of Laminated Veneer Lumber Beams Strengthened with Composite Materials // Fibers. – 2023. – Vol. 11, No. 3. – 24 p. DOI: 10.3390/fib11030024 EDN: ZMRIUQ

11. Chybiński M., Polus Ł. Experimental and Numerical Investigations of Laminated Veneer Lumber Panels // Archives of Civil Engineering. – 2021. – Vol. 67, No. 3. – P. 351-372. DOI: 10.24425/ace.2021.138060 EDN: EMKCCF

12. Dadkhah H., Loss C. Seismic Loss Assessment of Direct-DBD Platform-Type Cross-Laminated Timber Shear Wall Systems Using FEMA P-58 Methodology // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2024. – Vol. 22, No. 13. – P. 6379-6417. DOI: 10.1007/s10518-024-01998-7 EDN: HPRSMM

13. He X., Zhu X. Two-Dimensional Acoustic Emission Source Localization on Layered Engineered Wood by Machine Learning: A Case Study of Laminated Veneer Lumber Plate Structure // Structural Health Monitoring. – 2024. – Vol. 23, No. 4. DOI: 10.1177/14759217231202544 EDN: RSPWNA

14. Pan YU., Tannert T., Kaushik K., Xiong H., Ventura C.E. Seismic Performance of a Proposed Wood-Concrete Hybrid System for High-Rise Buildings // Engineering Structures. – 2021. – Vol. 238. – 112194 p. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112194 EDN: IBNAOH

15. Romero A., Odenbreit C. Experimental Investigation on Strength and Stiffness Properties of Laminated Veneer Lumber (LVL) // Materials. – 2023. – Vol. 16, No. 22. – 7194 p. DOI: 10.3390/ma16227194 EDN: WWMBVD

16. You T., Teweldebrhan B.T., Wang W., Tesfamariam S. Seismic Loss and Resilience Assessment of Tall-Coupled Cross-Laminated Timber Wall Building // Earthquake Spectra. – 2023. – Vol. 39, No. 2. – P. 727-747. DOI: 10.1177/87552930231152512 EDN: ZKVGMV

УДК 004.92

Поваров М. В., Афанасьев Д. А., Васин И. И.
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ПРОЕКТИРОВАНИЕ «ЧЕСТНОЙ СЛОЖНОСТИ» В ХАРДКОРНЫХ ИГРАХ: ТЕЛЕГРАФИРОВАНИЕ АТАК И КАДРЫ НЕУЯЗВИМОСТИ

Аннотация: в статье исследуются принципы проектирования «честной сложности» в хардкорных компьютерных играх. Рассматриваются механики телеграфирования атак и кадров неуязвимости (i-frames), их роль в создании воспринимаемой справедливости игрового вызова. Приводится сравнительный анализ аналогов и описывается практическая реализация данных механик в прототипе игры «Tower of the End» на движке Unity, демонстрирующая баланс между сложностью и доступностью геймплея для игроков.

Ключевые слова: Геймдизайн, честная сложность, телеграфирование атак, кадры неуязвимости, boss rush, FPS, Unity, искусственный интеллект противника.

Введение

Проблема баланса между сложностью и доступностью остаётся одной из центральных в геймдизайне. Особенно остро она стоит в хардкорных жанрах, требующих высокого уровня мастерства. Традиционно принято считать, что высокая сложность отталкивает широкую аудиторию, однако опыт таких игр, как Dark Souls 3, ULTRAKILL и Devil May Cry 5, опровергает этот тезис: их многомиллионные аудитории говорят о том, что сложность сама по себе не является барьером – барьером является сложность «нечестная» [1].

«Честная сложность» (fair challenge) – термин, закреплённый в практике геймдизайна, – означает такую степень трудности, при которой каждая неудача игрока объяснима и обоснована: игрок понимает, что именно он сделал не так, и имеет инструменты для исправления ошибки [2]. Противоположностью является «нечестная» сложность, при которой урон наносится без предупреждения, а механики уклонения не предоставляют достаточно времени для реакции. Именно разграничение этих двух подходов определяет, будет ли игрок воспринимать поражение как мотивацию к повторной попытке или как повод бросить игру [3].

Статья посвящена двум ключевым техническим механикам реализации честной сложности: телеграфированию атак противника и кадрам неуязвимости (invincibility frames, i-frames) при уклонении [4]. Практической базой исследования служит прототип игры «Tower of the End» – хардкорного boss rush FPS с дарк-фэнтези сеттингом, разработанного в игровом движке Unity.

Цель исследования – описать принципы проектирования честной сложности через призму указанных механик и продемонстрировать их конкретную реализацию в игровом прототипе.

Для достижения цели поставлены следующие задачи: определить понятие честной сложности и её компоненты; проанализировать механики телеграфирования атак и i-frames в играх-аналогах; описать реализацию данных механик в прототипе «Tower of the End».

Результаты исследования

В классической работе по геймдизайну Дж. Шелл формулирует принцип: игровой вызов должен быть ощутимым, но не непреодолимым. Игрок должен чувствовать, что победа достижима при должном уровне мастерства [1]. Это центральное требование к честной сложности.

На практике честная сложность в хардкорных экшн-играх обеспечивается тремя условиями. Во-первых, предсказуемостью: атаки противника должны иметь чёткие подготовительные фазы, позволяющие игроку распознать угрозу до её реализации. Во-вторых, реактивностью управления: игрок должен иметь инструмент уклонения, гарантированно работающий при своевременном применении [2]. В-третьих, обучаемостью: паттерны поведения противника должны быть достаточно последовательными, чтобы игрок мог их изучить и выработать стратегию противодействия.

Нарушение любого из этих условий переводит сложность в категорию «нечестной». Например, атака без анимации предупреждения лишает игрока возможности отреагировать вне зависимости от его уровня мастерства. Аналогично, уклонение без гарантии защиты делает механику ненадёжной и лишает игрока чувства контроля [3].

Телеграфирование атак – это совокупность визуальных, звуковых и интерфейсных сигналов, сообщающих игроку о предстоящем действии противника до его фактического выполнения. Данная концепция напрямую восходит к принципам геймдизайна [5]: игрок должен быть готов к событию психологически, иначе оно воспринимается не как вызов, а как произвол.

В современных хардкорных играх применяется несколько уровней телеграфирования, которые часто используются в комбинации. Анимационное телеграфирование – наиболее распространённый способ: противник выполняет характерное движение (замах, стойку, прыжок) перед атакой. В Dark Souls III каждая атака босса сопровождается уникальной и узнаваемой анимацией подготовки, достаточно продолжительной для своевременной реакции. В Devil May Cry 5 аналогичный принцип реализован в ещё более динамичной форме, а ключевые опасные атаки дополнительно выделены яркими световыми эффектами и уникальными звуковыми сигналами, позволяя мгновенно считать угрозу даже в условиях высокого

темпа боя [5]. В ULTRAKILL атаки врагов телеграфируются отчётливыми вспышками, что позволяет реагировать на угрозу без потери скорости.

Интерфейсные индикаторы выносят предупреждение на уровень HUD: цветовые предупреждения, мигающие иконки, шкалы заряда атаки. Звуковое сопровождение дополняет картину: уникальные звуки подготовки атаки создают условный рефлекс у игрока, позволяя реагировать даже без визуального контакта.

Критически важным параметром телеграфирования является окно реакции – временной интервал между началом анимации предупреждения и моментом нанесения урона. В хардкорных играх это окно намеренно сокращается по мере роста сложности, однако никогда не должно опускаться ниже физиологически обоснованного минимума. Среднее время простой реакции человека составляет 150–250 миллисекунд [5]; следовательно, минимальное окно реакции должно включать этот порог с запасом, иначе уклонение становится невозможным даже при правильном распознавании сигнала.

Сравнительный анализ ключевых механик честной сложности в исследованных играх представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ механик честной сложности в играх-аналогах и прототипе

Игра / Механика	**Телеграфирование атак**	**i-frames при уклонении**	**Визуальные индикаторы**	**Звуковые сигналы**	**HUD предупреждения**
Dark Souls III	Да	Да (перекат)	Да	Да	Нет
ULTRAKILL	Да	Да (рывок)	Да	Да	Частично
Devil May Cry 5	Да	Да (рывок)	Да	Да	Частично
Tower of the End (прототип)	Да	Да (рывок)	Да	Да	Да

Анализ таблицы показывает, что телеграфирование атак и i-frames при уклонении присутствуют во всех рассмотренных играх без исключения. Это свидетельствует об их статусе обязательного стандарта жанра, а не факультативной особенности. Отличительной чертой прототипа «Tower of the End» является наличие интерфейсного HUD-предупреждения, которое направлено на повышение читаемости наиболее опасных атак босса.

Кадры неуязвимости (invincibility frames, i-frames) – это временной интервал в начале анимации уклонения, во время которого хитбокс игрока

перестаёт регистрировать попадания атак [3]. Механика возникла в жанре beat-em-up и файтингов и впоследствии была заимствована RPG и экшн-играми. В современном контексте i-frames являются стандартным элементом системы уклонения в хардкорных играх.

Функциональная роль i-frames двояка. С одной стороны, они технически обеспечивают уклонение: без временного отключения хитбокса скользящий рывок сквозь атаку противника неизбежно приводил бы к получению урона, делая уклонение бессмысленным. С другой стороны, i-frames создают у игрока устойчивое ощущение контроля: своевременный рывок гарантированно защищает, что делает механику надёжным инструментом выживания, а не лотереей [1].

Ключевыми параметрами настройки кадров неуязвимости являются их общая длительность, задержка активации и время восстановления, определяющее частоту применения уклонения. В Dark Souls III это окно предоставляет игроку базовую, строго выверенную защиту, составляющую около половины секунды от всей анимации переката, что требует от него безупречного знания таймингов и фаз атаки босса. В ULTRAKILL и Devil May Cry 5 система уклонения настроена гораздо щедрее ввиду экстремально высокого темпа геймплея. Здесь окна неуязвимости при рывках или прыжках могут быть короче в рамках конкретной анимации, но они компенсируются практически мгновенным восстановлением способности, что идеально соответствует динамике скоростных шутеров и жанра hack-and-slash [5]. Компромисс между длительностью кадров неуязвимости и временем отката является одним из ключевых балансовых решений дизайнера: слишком длинное окно безопасности при коротком откате делает уклонение тривиальным инструментом, полностью лишающим игру вызова, в то время как слишком короткие кадры при долгом восстановлении неоправданно штрафуют игрока за рискованный, но тактически обоснованный манёвр.

Прототип игры «Tower of the End» разработан в движке Unity 6 (6000.3.10f1) [6]. Телеграфирование атак босса реализовано на трёх уровнях. Анимационный уровень: каждая атака Тёмного Рыцаря имеет уникальную вступительную анимацию. Визуально-зональный уровень: для особо опасных атак используется прямоугольная зона предупреждения на полу арены, визуально обозначающая область поражения до нанесения урона. Интерфейсный уровень: компонент WarningUI реализует HUD-предупреждение в форме мигающего треугольника. Когда игрок входит в зону поражения атаки, треугольник активируется. Данный трёхуровневый подход обеспечивает читаемость угрозы как для опытных игроков, ориентирующихся по анимации, так и для менее опытных, опирающихся на HUD. На рисунке 1 представлен трехуровневый подход для предупреждения игрока об опасной атаке.

Рисунок 1. Предупреждение об опасной атаке.

Механика i-frames реализована в компоненте FirstPersonController через свойство IsInvincible [7]. В момент начала анимации рывка (dash) свойство устанавливается в true; по завершении активной фазы рывка сбрасывается в false. Все источники урона – хитбокс оружия босса и зоны поражения – перед нанесением урона проверяют это свойство. Время восстановления рывка составляет 1,5 секунды; рывок доступен только на земле, что исключает бесконечное уклонение. Такое решение соответствует принципу единственной ответственности: логика неуязвимости инкапсулирована в одном месте, а остальные системы лишь запрашивают её состояние [8].

Поведение Тёмного Рыцаря построено на паттерне «стратегия»: каждая атака представляет собой отдельный ScriptableObject, унаследованный от абстрактного класса [9]. Перемещение и позиционирование ИИ на арене осуществляются при помощи навигационных мешей движка [10]. Использование паттернов позволяет добавлять новые типы атак без изменения основного контроллера босса, что соответствует принципу открытости-закрытости [8]. Описанная архитектура позволяет реализовать честную сложность на практике: Тёмный Рыцарь всегда предупреждает об атаке, а рывок с i-frames даёт надёжный инструмент уклонения при своевременной реакции.

Заключение

В ходе исследования установлено, что «честная сложность» в хардкорных играх обеспечивается комплексом взаимосвязанных проектных

решений, центральными из которых являются телеграфирование атак и кадры неуязвимости при уклонении. Анализ игр-аналогов (Dark Souls III, ULTRAKILL, Devil May Cry 5) подтвердил статус данных механик как жанрового стандарта: их отсутствие или некорректная реализация делает сложность «нечестной» и разрушает игровой опыт.

Практическая реализация указанных механик в прототипе «Tower of the End» продемонстрировала жизнеспособность подхода: трёхуровневое телеграфирование в сочетании с рывком на основе i-frames создаёт игровую среду, в которой высокая сложность воспринимается игроком как справедливый вызов, а не как произвол. Результаты тестирования прототипа показали, что победа над боссом достижима при правильном распознавании паттернов атак и своевременном применении уклонения.

Дальнейшим направлением исследования может стать расширение набора механик честной сложности: введение адаптивных паттернов поведения ИИ, системы подсказок при многократных поражениях, а также изучение психологических аспектов восприятия сложности различными категориями игроков.

Список литературы:

1. Шелл Дж. Геймдизайн: как создать игру, в которую будут играть все / Дж. Шелл. – М.: Альпина Паблишер, 2019. – 640 с.
2. Adams E. Fundamentals of Game Design / E. Adams. – 3rd ed. – Berkeley: New Riders, 2014. – 576 p.
3. Swink S. Game Feel: A Game Designer's Guide to Virtual Sensation / S. Swink. – Burlington: Morgan Kaufmann, 2009. – 358 p.
4. Hunicke R. MDA: A Formal Approach to Game Design and Game Research / R. Hunicke, M. LeBlanc, R. Zubek // Game Developer Conference Proceedings. – 2004. – P. 1–5.
5. Nystrom R. Game Programming Patterns [Электронный ресурс] // R. Nystrom. – URL: https://gameprogrammingpatterns.com/contents.html (дата обращения: 15.03.2026).
6. Unity User Manual [Электронный ресурс]: официальный сайт // Unity Technologies. – URL: https://docs.unity3d.com/Manual/index.html (дата обращения: 01.03.2026).
7. CharacterController [Электронный ресурс]: официальный сайт // Unity Technologies. – URL: https://docs.unity3d.com/ScriptReference/CharacterController.html (дата обращения: 15.03.2026).
8. Мартин Р. Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения / Р. Мартин. – СПб.: Питер, 2026. – 352 с.
9. Гамма Э. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Дж. Влиссидес. – СПб.: Питер, 2001. – 366 с.
10. NavMesh building components [Электронный ресурс]: официальный сайт // Unity Technologies. – URL: https://docs.unity3d.com/2022.1/Documentation/Manual/NavMesh-BuildingComponents.html (дата обращения: 26.03.2026).

УДК 004.89

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

СРАВНЕНИЕ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ОЦЕНКЕ ЛЕКСИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ АНГЛИЙСКОГО ЯЗЫКА ПО УРОВНЮ CEFR

Аннотация: Объект исследования – процесс автоматизированной разметки лексических единиц английского языка по уровню сложности шкалы CEFR с использованием больших языковых моделей. Предмет исследования – качество поэлементной CEFR-разметки, выполняемой современными большими языковыми моделями, в сравнении с экспертной разметкой. Цель – провести систематическое сравнение семи моделей и установить статистическую значимость попарных различий. Гипотеза – различия в качестве CEFR-разметки между моделями статистически значимы и формально устанавливаемы, а конкурентоспособное качество разметки достижимо открытыми моделями среднего размера, пригодными для локального исполнения. Методы исследования – экспертная разметка лексики по шкале CEFR с опорой на English Vocabulary Profile, сопоставительный анализ разметок семи языковых моделей и статистическая обработка данных. Корпус включает десять текстов уровней A2–C2 с экспертной разметкой 1085 лексических единиц. Качество оценивалось на четырёх уровнях: отбор лексических единиц, точность леммы, точность определения части речи и классификация по шкале CEFR. Для CEFR-классификации использованы accuracy, macro-F1, квадратично взвешенная каппа Коэна и средняя абсолютная ошибка с 95%-ными доверительными интервалами на основе метода bootstrap; попарное сравнение моделей выполнено тестом МакНемара. Показано, что ChatGPT 5.5, Claude Sonnet 4.6 и Gemma 4 31B демонстрируют статистически неразличимые результаты и образуют верхнюю группу.

Ключевые слова: большие языковые модели, CEFR, оценка лексики, English Vocabulary Profile, обработка естественного языка, квадратично взвешенная каппа, тест МакНемара.

1. Введение

Автоматизированная оценка владения иностранным языком – одно из активно развивающихся направлений компьютерной лингвистики и образовательных приложений искусственного интеллекта. Появление больших языковых моделей сделало возможной не только оценку текстов целиком, но и тонкую покомпонентную разметку отдельной лексики с учётом контекста [4; 5]. Стандартом описания уровня владения европейскими языками является шкала CEFR (Common European Framework of Reference for Languages), включающая шесть уровней – от A1 до C2 [8]. Для английского языка эталонным ресурсом установления соответствия между лексической единицей и уровнем CEFR служит English Vocabulary Profile (EVP) – открытая база Cambridge University

Press, в которой каждой лексической единице и каждому её значению присвоен уровень на основе анализа Cambridge Learner Corpus [6].

Существующие работы по автоматической CEFR-классификации делятся на два направления. Первое – определение уровня всего текста; в этом направлении применяются как классические признаковые модели [3], так и большие языковые модели [5]. Второе направление – поэлементная классификация отдельной лексической единицы в контексте, как это делается в работе [4] на материале письменных текстов, изучающих английский язык. Второе направление существенно более сложное: оно требует одновременного учёта полисемии, морфологических вариантов и многокомпонентных выражений (фразовых глаголов, устойчивых сочетаний). Большие языковые модели здесь имеют принципиальное преимущество перед частеречно-частотным базовым подходом за счёт явного использования контекстной семантики [4].

Однако открытым остаётся практический вопрос: какие из современных языковых моделей надёжно справляются с такой разметкой? Имеющиеся публикации либо ограничиваются сравнением двух-трёх моделей одного семейства [4], либо смещены в сторону оценки генерации текста заданного уровня, а не классификации лексики [5]. Цель настоящей работы – провести систематическое сравнение семи современных языковых моделей на задаче поэлементной CEFR-разметки английской лексики с применением статистически обоснованной методики оценки.

Гипотеза исследования состоит в том, что (1) различия в качестве поэлементной CEFR-разметки между современными большими языковыми моделями статистически значимы и могут быть формально установлены, и (2) конкурентоспособное качество разметки достижимо не только проприетарными моделями, но и открытыми моделями среднего размера, пригодными для локального исполнения.

2. Методология

2.1. Материал исследования

Эмпирическим материалом послужил корпус из десяти англоязычных текстов, отобранных из открытых источников и охватывающих диапазон уровней A2–C2. Тексты представлены четырьмя функциональными регистрами: журналистский (новостной), научно-популярный, литературно-художественный и формально-юридический. Каждая полнозначная лексическая единица (существительное, глагол, прилагательное, наречие) и каждое многокомпонентное выражение (фразовый глагол, предложно-фразовый глагол, фразово-предложный глагол, устойчивое выражение) размечены по шкале CEFR в соответствии с EVP. Функциональные слова, имена собственные, модальные и вспомогательные глаголы и числительные исключены. Общий объём экспертной разметки составил 1085 лексических единиц.

Корпус, експертна разметка, разметки сравниваемых моделей, текст промпта и программный код анализа размещены в открытом репозитории Zenodo [2].

2.2. Сравниваемые модели

Сравнивались семь современных языковых моделей, доступных через различные интерфейсы по состоянию на 2026 год: DeepSeek V4 Pro, Kimi K2.6, Llama 3.3 70B Instruct (компания Meta Platforms Inc. признана экстремистской организацией и запрещена на территории Российской Федерации), Qwen 3.7 Max, ChatGPT 5.5, Claude Sonnet 4.6 и Gemma 4 31B. Каждая модель получала единообразный запрос, содержащий полный текст и инструкцию: последовательно пройти по тексту, отобрать каждую полнозначную лексическую единицу и каждое многокомпонентное выражение, определить лемму, часть речи и уровень CEFR с учётом полисемии. Выход модели имел структуру JSON-массива записей вида {id, surface_form, lemma, pos, cefr}; экспертная разметка имела ту же структуру. Полный текст использованного промпта приведён в репозитории исследования [2].

2.3. Сопоставление разметок

Сопоставление разметки модели с экспертной разметкой проводилось по ключу (surface_form_lower, occurrence_index), где occurrence_index – порядковый номер вхождения данной поверхностной формы внутри текста, вычисленный после сортировки записей по идентификатору. Такой ключ устойчив к полисемии (повторные вхождения одной поверхностной формы получают разные ключи в порядке их встречаемости) и не зависит от расхождения моделей в схеме нумерации идентификаторов. Поверхностные формы и леммы приводились к нижнему регистру для нивелирования различий в политике капитализации между моделями.

Для каждой пары «эксперт – модель» в одном тексте набор записей разделялся на сопоставленные пары, несопоставленные экспертные записи (false negative, FN) и несопоставленные записи модели (false positive, FP). Эти множества использовались при расчёте метрик отбора единиц. Сопоставленные пары, в свою очередь, использовались для оценки точности леммы, точности части речи и метрик классификации CEFR.

2.4. Метрики

Качество модели оценивалось на четырёх уровнях. На первом уровне (отбор лексических единиц) рассчитывались Precision, Recall и F1: TP – число сопоставленных пар, FP – записи модели без сопоставления, FN – экспертные записи без сопоставления. На втором уровне рассчитывалась точность леммы – доля сопоставленных пар, в которых лемма модели совпала с экспертной. На третьем уровне аналогично определялась точность части речи. На четвёртом уровне выполнялась полная оценка CEFR-классификации на сопоставленных парах: accuracy, macro-F1, попарные precision/recall/F1 по уровням, квадратично взвешенная каппа Коэна (QWK) [7] и средняя абсолютная ошибка (MAE) после

кодирования уровней целыми числами (A1 - 0, A2 - 1, B1 - 2, B2 - 3, C1 - 4, C2 - 5).

Для каждой из четырёх ключевых CEFR-метрик строился 95%-ный доверительный интервал методом bootstrap по 1000 итераций ресемплирования пар «эксперт – модель» с возвращением. Попарное сравнение моделей по доле корректных предсказаний выполнялось тестом МакНемара с коррекцией непрерывности [9]; сравнение проводилось на пересечении предсказаний обеих моделей. Программная реализация выполнена на языке Python с использованием библиотек scikit-learn [10], NumPy, pandas, SciPy и matplotlib.

Необходимо подчеркнуть методологический аспект, существенный для интерпретации количественных значений. Метрики CEFR-классификации рассчитываются исключительно на сопоставленных парах – то есть только на тех лексических единицах, которые модель отметила и которые присутствуют в экспертной разметке. Ошибки отбора (раздел 3.1) и ошибки CEFR-классификации (разделы 3.3 и далее) дают тем самым взаимодополняющие характеристики модели. Такая декомпозиция методологически чище, но делает значения accuracy и macro-F1 напрямую несопоставимыми со значениями из исследований, в которых ошибки отбора засчитываются как ошибки классификации; полученные в настоящей работе значения CEFR-метрик ожидаемо выше тех, что фиксируются в сквозных схемах оценки.

3. Результаты

3.1. Отбор лексических единиц

Результаты этапа отбора лексических единиц приведены на рисунке 1. Наиболее точны Qwen 3.7 Max (F1 = 0,92), DeepSeek V4 Pro и Kimi K2.6 (по F1 = 0,91). Существенно отстаёт Llama 3.3 70B Instruct (F1 = 0,52 при Recall = 0,42): модель пропустила 624 экспертных вхождения из 1085. Низкий Recall при умеренном Precision указывает не на излишнюю разметку, а на систематический пропуск релевантных единиц – поведение, характерное для этой модели при обработке длинных текстов.

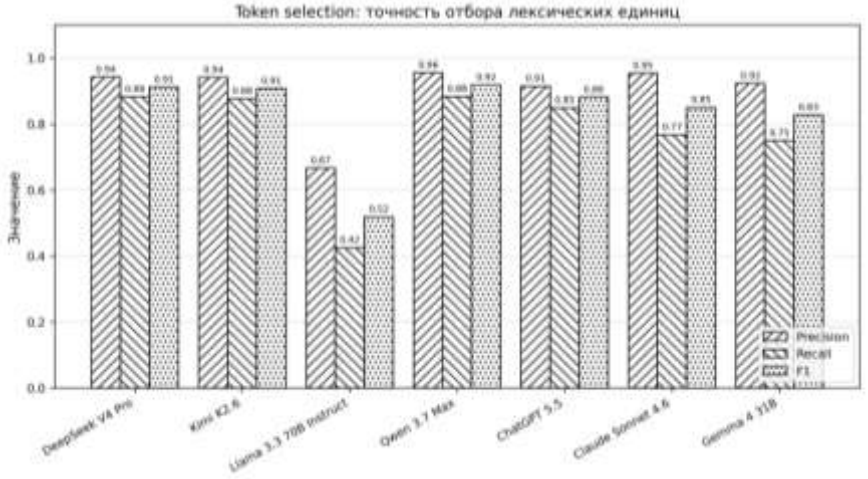


Рисунок 1. Точность отбора лексических единиц (Precision, Recall, F1) по сравниваемым моделям

3.2. Точност леммы и части речи

На сопоставленных парах точность лемматизации составила 98,4–99,3% по моделям; точность определения части речи – 95,4–99,7%. Эти высокие значения позволяют утверждать, что наблюдаемые ниже расхождения в классификации CEFR не вызваны систематическими ошибками в нижележащих лексико-грамматических полях, и что выбранный ключ сопоставления (по поверхностной форме и порядковому номеру) корректен.

3.3. Классификация CEFR

Общие метрики классификации CEFR представлены в таблице 1 и на рисунке 2. Accuracy располагается в диапазоне 0,527–0,681; macro-F1 – 0,426–0,658. QWK при этом существенно выше: 0,796–0,922. Подобный разрыв объясняется тем, что подавляющее большинство ошибок моделей сосредоточено в окрестности ±1 уровень от истинного: ошибки на два и более уровней крайне редки. Поскольку QWK штрафует ошибки квадратично по расстоянию между классами, такие малые отклонения дают пренебрежимо малый штраф. Этот же факт отражает MAE: средняя ошибка моделей лежит в диапазоне 0,34–0,58 уровня CEFR – менее одного шага шкалы.

Таблица 1. Общие метрики классификации CEFR; в квадратных скобках после точечной оценки указаны нижняя и верхняя границы 95%-ного доверительного интервала (bootstrap, 1000 итераций)

Модель	Accuracy	Macro-F1	QWK	MAE
DeepSeek V4 Pro	0,608 [0,577; 0,640]	0,458 [0,427; 0,488]	0,870 [0,857; 0,883]	0,413 [0,379; 0,446]
Kimi K2.6	0,612 [0,582; 0,644]	0,523 [0,484; 0,559]	0,876 [0,860; 0,890]	0,416 [0,381; 0,450]
Llama 3.3 70B Instruct	0,527 [0,482; 0,571]	0,426 [0,383; 0,468]	0,796 [0,758; 0,828]	0,581 [0,518; 0,646]
Qwen 3.7 Max	0,570 [0,540; 0,600]	0,582 [0,548; 0,614]	0,886 [0,872; 0,900]	0,460 [0,427; 0,496]
ChatGPT 5.5	0,681 [0,648; 0,711]	0,658 [0,623; 0,691]	0,921 [0,908; 0,932]	0,336 [0,302; 0,370]
Claude Sonnet 4.6	0,660 [0,627; 0,694]	0,622 [0,583; 0,660]	0,910 [0,897; 0,922]	0,356 [0,321; 0,393]
Gemma 4 31B	0,663 [0,630; 0,697]	0,644 [0,607; 0,681]	0,922 [0,910; 0,933]	0,344 [0,309; 0,380]

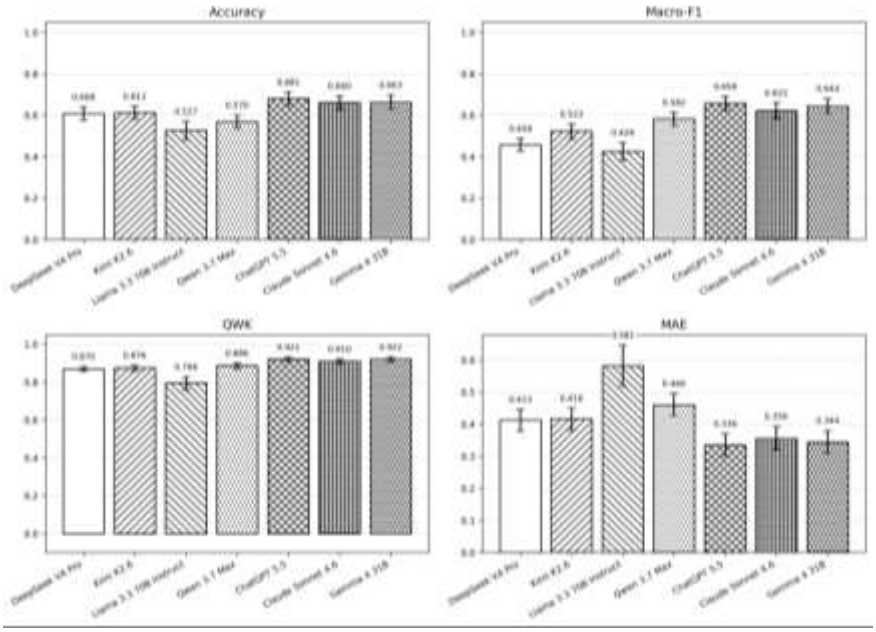


Рисунок 2. Общие метрики классификации CEFR с 95%-ными доверительными интервалами bootstrap

3.4. Распределение ошибок по уровням

Анализ матриц ошибок выявляет несколько устойчивых закономерностей, общих для большинства моделей. Во-первых, наблюдается систематическое смещение в сторону более высокого уровня в среднем диапазоне шкалы: переходы A2 - B1 и B1 - B2 встречаются заметно чаще, чем обратные. Особенно ярко это проявляется у Qwen 3.7 Max (A2 - B1 – 125 случаев; B1 - B2 – 116). Во-вторых, у DeepSeek V4 Pro и Llama 3.3 70B Instruct наблюдается «обрезание» верхней части шкалы: лексические единицы уровней C1 и C2 систематически классифицируются как B2 или C1. Для DeepSeek V4 Pro из 57 экспертных вхождений уровня C1 верно отмечены только 3, из 56 вхождений уровня C2 – также только 3. Это поведение драматически снижает per-class F1 модели на этих уровнях: до 0,06 для C1 и 0,10 для C2.

Рисунок 3 демонстрирует характерную для верхней группы моделей структуру ошибок: массивная диагональ при пренебрежимо малых отклонениях на два и более уровня. У отстающих моделей при той же общей структуре заметно сокращены диагональные значения для C1 и C2.

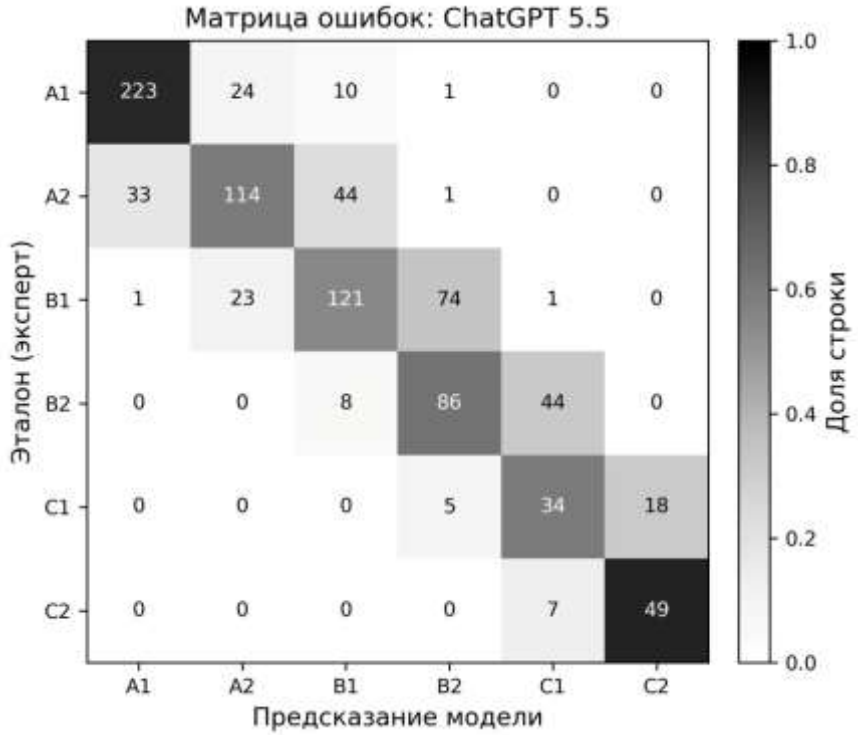


Рисунок 3. Матрица ошибок ChatGPT 5.5 (числа – абсолютные значения; интенсивность серого – доля строки)

3.5. F1 по уровням CEFR

Рисунок 4 представляет тепловую карту попарной F1 по уровням CEFR. Все семь моделей одинаково хорошо распознают уровень A1 (F1 = 0,77–0,90), однако при переходе к средним и старшим уровням качество распознавания заметно падает и расходится. На уровнях C1 и C2 различия между моделями наиболее выражены: лучшие модели (Qwen 3.7 Max, ChatGPT 5.5, Gemma 4 31B) поддерживают F1 ≥ 0,5 на уровне C2, тогда как DeepSeek V4 Pro и Llama 3.3 70B Instruct проваливаются ниже 0,15.

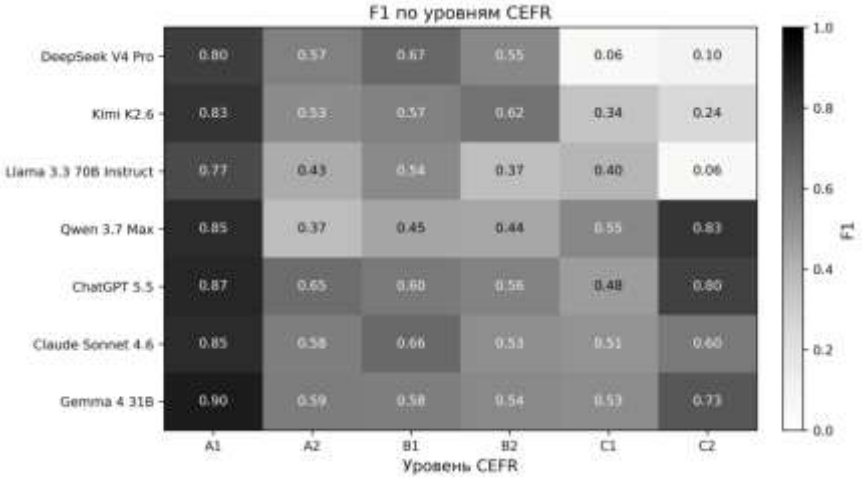


Рисунок 4. F1 по уровням CEFR для сравниваемых моделей

3.6. Попарное сравнение моделей

Тест МакНемара (рисунок 5) выявляет три устойчиво выделяющиеся группы. ChatGPT 5.5, Claude Sonnet 4.6 и Gemma 4 31B образуют верхнюю группу: попарные различия между ними статистически не значимы ($p > 0,05$ во всех трёх парах). Эти три модели значимо превосходят все остальные на уровне $p < 0,0001$ в большинстве пар. Заметно, что в верхнюю группу входит локальная модель Gemma 4 31B с относительно небольшим числом параметров – это указывает на возможность сопоставимого качества разметки CEFR без обращения к закрытым проприетарным моделям.

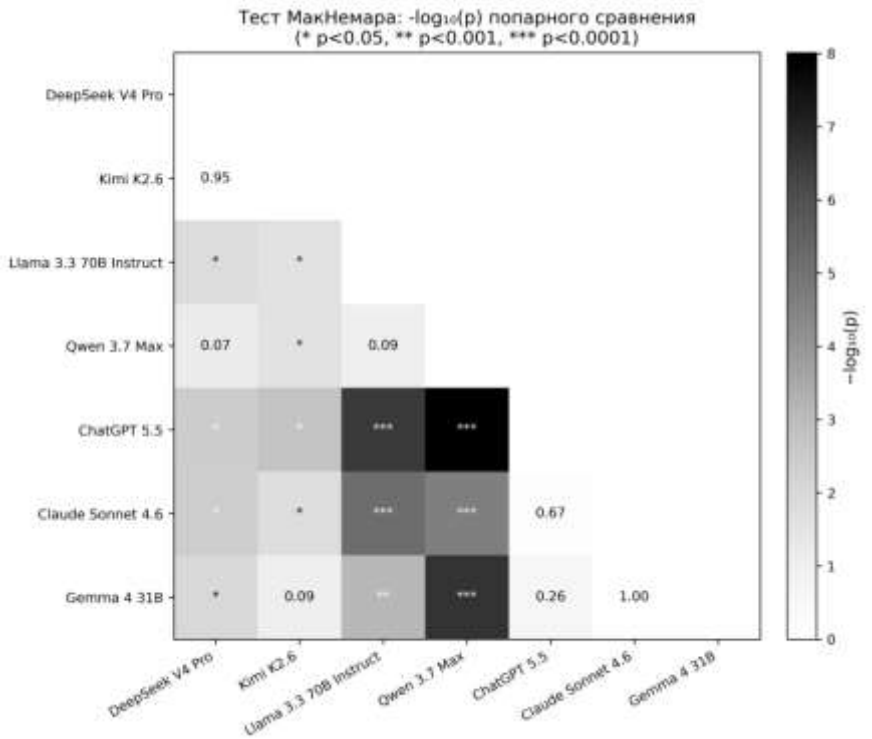


Рисунок 5. Попарное сравнение моделей тестом МакНемара (* $p < 0,05$; ** $p < 0,001$; *** $p < 0,0001$)

4. Заключение

В работе проведено сравнение семи современных языковых моделей на задаче поэлементной CEFR-разметки английской лексики. Основные выводы сводятся к следующему. Современные большие языковые модели надёжно определяют лемму и часть речи (точность ≥ 95% на сопоставленных парах), однако точная классификация по шести уровням CEFR остаётся трудной задачей: наилучший accuracy составил 0,681. При этом квадратично взвешенная каппа Коэна достигает 0,92, что свидетельствует о том, что модели правильно понимают относительный порядок сложности лексики, даже когда ошибаются в конкретном уровне.

Модели ChatGPT 5.5, Claude Sonnet 4.6 и Gemma 4 31B статистически неразличимы и формируют верхнюю группу. Присутствие в этой группе локальной модели Gemma 4 31B имеет практическое значение: для образовательных приложений с требованием локального исполнения существуют конкурентоспособные модели среднего размера. Llama 3.3 70B Instruct, несмотря на сопоставимый объём параметров, показывает существенно худший отбор лексических единиц на длинных текстах – характеристика, которую необходимо учитывать при выборе модели для систем массовой разметки.

Все модели обнаруживают систематический сдвиг в сторону более высоких уровней в среднем диапазоне шкалы и недооценивают уровни C1/C2 – закономерность, согласующаяся с общей тенденцией больших языковых моделей к избеганию крайних оценок при ординальной классификации [1]. Это указывает на полезность дополнительной донастройки или промптинга, специально нацеленных на верхние уровни шкалы CEFR.

Полученные результаты предоставляют эмпирически обоснованный материал для выбора языковой модели при разработке систем автоматизированной оценки лексики L2-учащимися. Предложенная методика с разделением метрик на четыре уровня (отбор единиц, лемма, POS, CEFR) с поддержкой доверительных интервалов методом bootstrap и попарного тестирования МакНемара применима к ординальным задачам разметки в смежных областях.

Список литературы:

1. Зайцев Д.В. Почему большие языковые модели не (всегда) рассуждают как люди? // Вестник Московского университета. Серия 7. Философия. – 2024. – Т. 48, № 1. – С. 76–93. DOI: 10.55959/MSU0201-7385-7-2024-1-76-93 EDN: KEJEJL

2. Kochemirov, M. A., Kozlov A. V., Ushakov D.P. CEFR-level expert and large language model annotations of English lexical units across ten texts // Zenodo, 2026. DOI: 10.5281/zenodo.20610037

3. Лапошина А.Н., Лебедева М.Ю. Текстометр: онлайн-инструмент определения уровня сложности текста по русскому языку как иностранному // Русистика. – 2021. – Т. 19, № 3. – С. 331–345. DOI: 10.22363/2618-8163-2021-19-3-331-345 EDN: YQLLXW

4. Bannò S., Knill K.M., Gales M.J.F. Exploiting the English Vocabulary Profile for L2 word-level vocabulary assessment with LLMs [Электронный ресурс] // Arxiv.org. – URL: https://arxiv.org/abs/2506.02758 (дата обращения: 08.06.2026).

5. Benedetto L., Gaudeau G., Caines A., Buttery P. Assessing how accurately large language models encode and apply the Common European Framework of Reference for Languages // Computers and Education: Artificial Intelligence. – 2025. – Vol. 8. – Article 100353. DOI: 10.1016/j.caeai.2024.100353 EDN: DWKEZQ

6. Capel A. Completing the English Vocabulary Profile: C1 and C2 vocabulary // English Profile Journal. – 2012. – Vol. 3. – Article e1. DOI: 10.1017/S2041536212000013

7. Cohen J. Weighted kappa: Nominal scale agreement with provision for scaled disagreement or partial credit // Psychological Bulletin. – 1968. – Vol. 70, № 4. – P. 213–220. DOI: 10.1017/S2041536212000013

8. Common European Framework of Reference for Languages: Learning, teaching, assessment // Companion volume. Strasbourg: Council of Europe Publishing, 2020. – 278 p.

9. Dietterich T.G. Approximate Statistical Tests for Comparing Supervised Classification Learning Algorithms // Neural Computation. – 1998. – Vol. 10, № 7. – P. 1895–1923. DOI: 10.1162/089976698300017197

10. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python // Journal of Machine Learning Research. – 2011. – Vol. 12. – P. 2825–2830.

УДК 664.8:663.25

Оселедцева И. В., Стрибижева Л. И., Гаценко М. В., Коновалов Д. В.
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

ЭНОКРАСИТЕЛЬ ИЗ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ ВИНОДЕЛИЯ: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ

Аннотация: в статье рассмотрены современные методы выделения энокрасителя (антоцианового красителя) из винограда и виноградной выжимки. Проанализированы классические и «зелёные» методы экстракции, включая твёрдо-жидкостную экстракцию с этанолом, ультразвуковую, микроволновую, омический нагрев и ферментативную экстракцию. Отдельное внимание уделено устойчивости цвета, влиянию сопутствующих фенольных соединений и возможностям применения полученных экстрактов при разработке безалкогольных напитков функциональной направленности. Актуальность исследования обосновывается на разработке технологии получения энокрасителя из вторичных ресурсов виноделия.

Ключевые слова: энокраситель, виноградная выжимка, антоцианы, безалкогольные напитки, ультразвуковая экстракция, природные растворители, омический нагрев, ферментативная экстракция.

Виноградарство и виноделие относится к ведущим отраслям агропромышленного комплекса, при этом до 80 % выращиваемого винограда используется для производства вина. Вторичные продукты виноделия, образующиеся в процессе переработки винограда, представляют собой основную проблему утилизации отходов [3]. Ко вторичным продуктам относят: виноградную выжимку и дрожжевые осадки, которые при отсутствии переработки создают экологические проблемы [1, 2].

Виноградная выжимка состоит из кожицы, семян и гребней и содержит высокое количество полезных соединений, а именно полифенолов (антоцианов, флавонолов, фенольных кислот и пищевых волокон) [2, 3]. Традиционно её используют в спиртовой промышленности для перегонки, однако в последние годы рассматривают как источник биоактивных компонентов для пищевой и фармацевтической промышленности [2].

Антоцианы винограда - основные пигменты, которые обладают выраженными антиоксидантными свойствами [1, 3]. Особый интерес представляет получение энокрасителя – натурального красителя виноградного происхождения из вторичных ресурсов виноделия с последующим использованием в производстве безалкогольных напитков.

1. Виноградная выжимка как источник энокрасителя

По оценкам, винодельческая промышленность в мире ежегодно вырабатывает около 8,49 млн тонн виноградной выжимки, которая зачастую рассматривается как отход [5]. При этом химический состав выжимки является

ценным сырьём для получения биоактивных веществ и натуральных красителей.

Исследования экстрактов из выжимки показывают высокую антиоксидантную активность, антибактериальные и противовоспалительные свойства, сравнимые или превосходящие свойства самого вина [5]. Это подтверждает перспективность использования виноградной выжимки как сырья для получения не только красителя, но и функционального компонента для производства безалкогольных напитков.

2. Классические методы экстракции антоцианов из винограда и выжимки

Традиционно для извлечения антоцианов из растительного сырья используют смеси метанол-вода-кислота или ацетон-вода-кислота, обеспечивающие высокую растворяющую способность в отношении полифенолов [1, 3]. Однако токсичность метанола и ацетона исключает их прямое применение при производстве пищевых ингредиентов и напитков.

3. Современные «зелёные» технологии выделения энокрасителя

3.1 Ультразвуковая экстракция (UAE)

Ультразвуковая обработка усиливает массообмен за счёт разрушения клеточных стенок и ускорения диффузии, что позволяет значительно сократить время экстракции. В сравнительном исследовании с использованием воды, водно-этанольной смеси и этанола, а также трёх методов – микроволновой экстракции, ультразвуковой и классической – было выявлено, что ультразвук в сочетании с водно-этанольным растворителем позволяет получать экстракты выжимки с высокой концентрацией фенолов и антоцианов при относительно коротком времени [8].

В отдельной работе исследована эффективность ультразвуковой экстракции антоцианов из виноградной выжимки с использованием биорастворителей (этанол, пропиленгликоль, изопропанол, этиленгликоль) в различных концентрациях и при разных температурах [9]. Было показано, что при 50 °C и 50 % (об.) растворителя достигается максимум ультразвуковой интенсивности, а максимальное уровень по содержанию антоцианов наступает уже через 5 минут обработки, дальнейшее увеличение времени приводит лишь к незначительному росту выхода при повышенном энергопотреблении [9].

3.2. Микроволновая и комбинированная (ультразвук + микроволны) экстракция

Микроволновая экстракция (MAE) обеспечивает быстрый нагрев растворителя и сырья, что ускоряет выход полифенолов. В работе, посвящённой сравнению зелёных методов выделения антоцианов из выжимки винограда сорта «Санджовезе», были исследованы ультразвуковая и микроволновая экстракции с использованием подкисленной воды, водно-этанольной смеси и природных эвтектических растворителей (NaDES) [10].

Микроволновая экстракция показала более высокие значения общего индекса антоцианов (до 99,6 мг/г сухого вещества) по сравнению с ультразвуком (до 75,2 мг/г) и классической экстракцией на метаноле (47,1 мг/г) [10]. При этом использование пищевых растворителей (50 % этанол, подкисленная вода) и NaDES позволило отказаться от токсичных органических растворителей.

3.3. Омический нагрев

Омический нагрев основан на прохождении электрического тока через сырьё и растворитель, что вызывает быстрый и равномерный нагрев. В исследовании по сравнению омического нагрева и классической экстракции с использованием пищевых растворителей (вода с лимонной кислотой) было показано, что оба метода обеспечивают сопоставимые выходы общих фенолов и антоцианов, однако омический нагрев позволяет сократить время обработки и энергозатраты, полностью обходясь без органических растворителей [11].

3.4. Природные глубокоэвтектические растворители

Природные глубокоэвтектические растворители представляют собой смесь органических кислот, сахаров, аминокислот и холинсодержащих солей, образующих жидкую фазу с особыми растворяющими свойствами.

В работе по получению готового к применению антоцианового экстракта из виноградной выжимки для окрашивания жевательных конфет были исследованы эвтектические смеси на основе хлорида холина с уксусной и лимонной кислотами [12]. Экстракцию проводили с использованием высокоскоростного диспергатора (Ultra-Turrax) при 45 °C, 5000 об/мин в течение 10 минут. Полученные экстракты содержали до 60 мкг цианидин-3-глюкозида/г сухой выжимки и обладали высокой антиоксидантной активностью [12].

3.5. Ферментативная экстракция

Ферментативные методы позволяют селективно разрушать компоненты клеточных стенок (целлюлозу, пектины, гемицеллюлозу), улучшая выход полифенолов при мягких условиях. В исследовании, посвящённом ферментативной экстракции фенольных соединений из красной виноградной выжимки, изучали действие целлюлазы, пектиназы и гемицеллюлазы при варьировании концентрации фермента, времени и соотношения твёрдое/жидкое [13].

Показано, что пектиназа наиболее эффективна в отношении антоцианов, тогда как гемицеллюлаза преимущественно увеличивает выход фенольных кислот, а целлюлаза – катехинов [13]. В целом ферментативная экстракция обеспечивала значительный рост суммарного содержания фенольных соединений и антиоксидантной активности по сравнению с контролем без фермента [13].

4. Факторы, влияющие на стабильность антоциановых экстрактов и энокрасителей

Одной из ключевых проблем практического применения антоциановых экстрактов является их ограниченная стабильность при хранении и переработке пищевых продуктов. В отличие от синтетических красителей, антоцианы чувствительны к воздействию температуры, света, кислорода, pH среды и присутствию ионов металлов [3, 4]. Под влиянием данных факторов возможно изменение окраски, снижение интенсивности цвета и разрушение отдельных пигментных компонентов.

Наиболее важным фактором является кислотность среды. Антоцианы проявляют максимальную устойчивость в кислой среде при значениях pH от 2 до 4. В таких условиях преобладает флавилиевая форма молекулы, обеспечивающая яркую красную окраску. При повышении pH происходят структурные превращения антоцианов, сопровождающиеся изменением цвета от красного к фиолетовому и синему, а также снижением устойчивости пигментов.

Температурное воздействие также оказывает существенное влияние на сохранность антоцианов. При длительном нагревании наблюдается деградация пигментов и уменьшение антиоксидантной активности экстрактов [5]. Поэтому современные технологии получения энокрасителей ориентированы на применение мягких режимов обработки, позволяющих минимизировать термическое разрушение биологически активных соединений.

Дополнительным способом повышения стабильности является использование явления копигментации. В присутствии флавонолов, фенольных кислот и других полифенольных соединений происходит образование нековалентных комплексов, которые способствуют усилению окраски и повышению устойчивости антоцианов к внешним воздействиям. Именно поэтому экстракты, содержащие полный комплекс полифенолов виноградной выжимки, зачастую демонстрируют более высокую стабильность по сравнению с очищенными антоциановыми препаратами.

Для повышения устойчивости антоциановых экстрактов также используются различные технологические подходы, включая подбор состава растворителей, регулирование кислотности среды и оптимизацию условий хранения [4, 5].

Таким образом, обеспечение стабильности антоциановых экстрактов является важнейшим условием создания конкурентоспособных натуральных энокрасителей для пищевой промышленности.

4.1. Преимущества и ограничения использования энокрасителей в безалкогольных напитках

В последние годы наблюдается устойчивый рост интереса потребителей к продуктам с натуральным составом и отказом от синтетических пищевых добавок. В связи с этим натуральные красители растительного происхождения рассматриваются как перспективная альтернатива искусственным красителям при производстве безалкогольных напитков [2, 5].

Энокрасители, полученные из виноградной выжимки, обладают рядом преимуществ. Прежде всего они являются продуктом переработки вторичных ресурсов виноделия, что соответствует принципам циркулярной экономики и безотходного производства. Использование такого сырья позволяет одновременно решать экологические задачи утилизации отходов и получать востребованные пищевые ингредиенты.

Дополнительным преимуществом является наличие у антоцианов антиоксидантной активности. В отличие от большинства синтетических красителей, антоциановые экстракты способны не только формировать привлекательный внешний вид напитка, но и повышать его функциональную ценность [1, 3]. Наличие полифенольных соединений может способствовать защите компонентов напитка от окислительных процессов и улучшать потребительское восприятие продукта.

Вместе с тем применение энокрасителей связано с рядом технологических ограничений. Наиболее значимыми являются нестабильность окраски при изменении кислотности среды, чувствительность к воздействию света и температуры, а также вариабельность состава исходного сырья. Содержание антоцианов в виноградной выжимке зависит от сорта винограда, климатических условий выращивания, степени зрелости ягод и особенностей технологии виноделия [6].

Кроме того, для промышленного внедрения натуральных энокрасителей необходима стандартизация процессов получения экстрактов и разработка критериев оценки качества готовой продукции. Важное значение имеют исследования по увеличению сроков хранения красителей и обеспечению воспроизводимости их окрашивающих свойств.

Несмотря на существующие ограничения, современные технологии экстракции и стабилизации антоцианов позволяют рассматривать энокрасители как одно из наиболее перспективных направлений использования вторичных ресурсов виноделия при производстве функциональных безалкогольных напитков [9].

5. Примеры пищевых применений антоциановых экстрактов из винодельческих отходов

В исследовании по разработке ферментированных безалкогольных напитков типа комбуча в качестве ингредиентов использовали виноградную выжимку и винные осадки [14]. В ходе ферментации симбиотической культурой бактерий и дрожжей (SCOBY) были получены напитки с высоким

содержанием антоцианов: до 5,60 мг/л при использовании винных осадков и до 1,69 мг/л при использовании виноградной выжимки [14].

Полученные напитки отличались стабильными показателями pH, содержания кислот, сахаров и этанола в течение 21 дня хранения и позиционировались как «3S»-напитки (Safe, Salubrious, Sustainable) [14]. Эти данные подтверждают возможность прямого использования винодельческих побочных продуктов для создания безалкогольных напитков, обогащённых антоцианами.

Заключение

Виноградная выжимка и другие побочные продукты виноделия являются богатым источником антоцианов и полифенолов, позволяя рассматривать их как ценное сырьё для получения натурального энокрасителя. Анализ литературы показывает широкий спектр доступных технологий экстракции, от классических твёрдо-жидкостных методов с этанолом и кислотой до современных «зелёных» подходов, включающих ультразвуковую и микроволновую экстракцию, омический нагрев, применение природных глубокоэвтектических растворителей и ферментативную экстракцию.

Современные исследования демонстрируют возможность получения антоциановых экстрактов с высокой антиоксидантной и противомикробной активностью, пригодных для использования в пищевых продуктах, а также примеры успешного внедрения таких экстрактов в функциональные напитки. В то же время остаётся потребность в разработке специализированных энокрасителей для безалкогольных напитков, ориентированных на устойчивость цвета и соответствие требованиям пищевого законодательства.

Список литературы:

1. Caponio G. R. et. al. Promising Application of Grape Pomace and Its Agri Food Valorization: Source of Bioactive Molecules with Beneficial Effects // Sustainability. – 2023. – Vol.15, No.11. – 9075 p. DOI: 10.3390/su15119075 EDN: ZYNTKR

2. Karastergiou A. et. al. Valorization of Grape Pomace: A Review of Phenolic Composition, Bioactivity, and Therapeutic Potential // Antioxidants. – 2024. – Vol.13, No.9. – 1131 p. DOI: 10.3390/antiox13091131 EDN: ZSNBTD

3. Trikas E. et. al. Extraction, separation and identification of anthocyanins from red wine by product and their biological activities // Journal of Functional Foods. – 2016. – Vol.35. – P. 548-558. DOI: 10.1016/j.jff.2016.06.033

4. Gordillo B. et. al. Assessment of the color modulation and stability of naturally copigmented anthocyanin grape colorants with different levels of purification // Food Research International. – 2018. – Vol.106. – P. 791-799. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.01.057

5. Castellanos Gallo L. et. al. Grape Pomace Valorization by Extraction of Phenolic Polymeric Pigments // Processes. – 2022. – Vol.10, No. 3. DOI: 10.3390/pr10030469 EDN: ERKNRQ

6. Moutinho J. et. al. Optimization of the Extraction Methodology of Grape Pomace Polyphenols for Food Applications // Molecules. – 2023. – Vol.28, No.9. – P. 3885. DOI: 10.3390/molecules28093885EDN: MBEZMY

7. Zhou Z, Yang D. Economical and eco-friendly isolation of anthocyanins from grape pomace with higher efficiency // Food Chem X. – 2022. – Vol. 10, No.15. – P. 100419.

8. Drosou C. A comparative study on different extraction techniques to recover red grape pomace polyphenols from vinification byproducts // Industrial Crops and Products. – 2015. – Vol. 75. – P. 141-149. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.05.063

9. Córdova A. et. al. Sustainable assessment of ultrasound-assisted extraction of anthocyanins with bio-based solvents for upgrading grape pomace // Ultrasonics Sonochemistry. – 2025. – No. 112. – 107201 p.

10 Lianza M. et. al. Green Method Comparison and Optimization of Anthocyanin Recovery from “Sangiovese” Grape Pomace: A Critical Evaluation of the Design of Experiments Approach // Molecules. – 2024. – Vol. 29, No.11. – 2679 p. DOI: 10.3390/molecules29112679 EDN: HJCJFY

11. Coelho M. et. al. Anthocyanin Recovery from Grape By Products by Combining Ohmic Heating with Food Grade Solvents: Phenolic Composition, Antioxidant, and Antimicrobial Properties // Molecules. – 2021. – Vol. 26, No.13. – 3838 p. DOI: 10.3390/molecules26133838 EDN: NBPKPB

12. Trentin J. et. al. Antioxidant Ready to Use Grape Pomace Extracts Recovered with Natural Eutectic Mixtures for Formulation of Color Rich Gummies // Foods. – 2024. – Vol. 13, No.17. – 3840 p. DOI: 10.3390/foods13172840

13. Stanek-Wandzel N. et. al. Evaluation of Cellulase, Pectinase, and Hemicellulase Effectiveness in Extraction of Phenolic Compounds from Grape Pomace // International Journal of Molecular Sciences. – 2024. – Vol. 25, No. 24. – 135138 p. DOI: 10.3390/ijms252413538 EDN: DIJQXM

14. Cánovas BM, Pérez-Novas I, García-Viguera C, Domínguez-Perles R, Medina S. Assessment of Winery By-Products as Ingredients as a Base of "3S" (Safe, Salubrious, and Sustainable) Fermented Beverages Rich in Bioactive Anthocyanins // Foods. – 2025. – Vol. 14, No.14 – 2514 p.

15. Качаев Х.Э., Стрибижев И.Р., Качаева Н.Ю., Стрибижева Л.И. Разработка технологии получения энотанина в рамках комплексной переработки вторичных продуктов виноделия / Х. Э. Качаев, И. Р. Стрибижев, Н. Ю. Качаева, Л. И. Стрибижева // Проблемы и перспективы научно-инновационного обеспечения агропромышленного комплекса регионов. Сборник докладов VII Международной научно-практической конференции. – Курск, 2025. – С. 753-756. EDN: ZNFFMM

16. Стрибижева Л.И., Качаева Н.Ю., Сидоренко А.И. [и др.]. Комплексная переработка вторичных продуктов виноделия / Л. И. Стрибижева, Н. Ю. Качаева, А. И. Сидоренко [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2025. – № 1 (399). – С. 115-119. DOI: 10.26297/0579-3009.2025.1.16 EDN: ZCUDED

17. Качаев Х.Э., Стрибижев И.Р., Стрибижева Л.И. Разработка эффективной технологии вторичной безотходной переработки продукции виноградарства и виноделия / Х. Э. Качаев, И. Р. Стрибижев, Л. И. Стрибижева // Молодежная наука. Сборник лучших научных работ молодых ученых. Материалы LI студенческой научной конференции. – Краснодар, 2024. – С. 376-379. EDN: WDZYNN

УДК 620.22

Копытков И. В.
Научный руководитель: Юхневич С. С., к.т.н., доцент
Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

УЛУЧШЕНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Аннотация: в статье представлен обзор современных методов улучшения свойств композитных материалов, применяемых в машиностроении, на основе анализа научных публикаций 2021–2025 гг. Рассмотрены подходы наномодифицирования, гибридизации, поверхностной обработки и СВЧ-модификации, а также проведена сравнительная оценка их влияния на механические, термические и эксплуатационные характеристики композитов. Показано, что комбинирование различных методов модификации обеспечивает синергетический эффект и позволяет создавать материалы с улучшенным комплексом свойств для перспективных инженерных применений.

Ключевые слова: композитные материалы, машиностроение, наномодифицирование, гибридные композиты, поверхностная обработка, механические свойства, углеродные нанотрубки, полимерные композиты.

В современном машиностроении композитные материалы выходят на передовые позиции благодаря сочетанию высокой удельной прочности, низкой плотности и способности адаптировать свои свойства под конкретные задачи проектирования, что делает их незаменимыми во многих отраслях.

Постоянное ужесточение эксплуатационных требований в аэрокосмической сфере, автомобилестроении и биоинженерии, заставляет учёных и инженеров активно искать новые, более совершенные методы повышения характеристик композитов.

Ключевая проблема исследования состоит в том, что композиционные материалы традиционного типа, представляющие собой полимерную матрицу, усиленную стекловолокном или углеволокном, при всех их высоких механических характеристиках обладают рядом существенных недостатков, которые серьёзно ограничивают их практическое использование, а именно низкой ударной вязкостью, подверженностью расслоению, недостаточной термостойкостью и ограниченным набором функциональных свойств, что требует поиска новых подходов к их модификации.

Актуальность проведённого исследования продиктована насущной потребностью в поиске и обосновании эффективных способов улучшения свойств композитных материалов, поскольку именно перспективы развития композиционных и гибридных материалов закладывают фундамент для технологического лидерства [12] машиностроения и определяют его

възможности по създанию конкурентоспособной продукции нового поколения.

Цель настоящей работы состоит в систематизации современных методов улучшения механических, термических и функциональных свойств композитных материалов, применяемых в машиностроении, на основе всестороннего анализа актуальных исследований [12], опубликованных в период с 2021 по 2025 год.

В рамках исследования для достижения поставленной цели необходимо последовательно решить основные задачи:

1. Обзор и классификация современных методов улучшения свойств композитных материалов.
2. Анализ количественных изменений механических и термических характеристик композитов под воздействием различных методов модификации.
3. Выявление механизмов, обеспечивающих улучшение свойств при каждом из рассмотренных подходов.
4. Определение преимуществ и ограничений каждого метода с оценкой их перспектив для дальнейшего использования в машиностроительной отрасли.

Использование наноразмерных наполнителей при создании композиционных материалов, позволяет добиться существенного повышения их механических, термических и функциональных свойств, и в этом контексте особенно выделяются углеродные нанотрубки и графен, которые на сегодняшний день являются наиболее изученными нанонаполнителями благодаря своим уникальным характеристикам, включая исключительную прочность, высокую удельную поверхность и выдающуюся электро- и теплопроводность.

Значительное повышение механических свойств углепластиковых материалов достигается посредством введения в полимерное связующее нанопорошков различных химических соединений [12], и данный подход, известный как наномодифицирование, показал свою высокую эффективность, причём особенно хорошие результаты были получены при использовании [9] углеродных нанопорошков, включая наноалмазы [12].

Расширение функциональных возможностей углепластиковых конструкций также решается с помощью наномодифицирования полимерного связующего, для чего в него вводят углеродные нанотрубки, наночастицы (в частности, детонационные наноалмазы) и фуллерены, что позволяет существенно расширить область применения таких материалов.

Введение углеродных наночастиц в полипропилен даёт переменные отклики в тестах на прочность и теплопроводность, и каждый из этих откликов коррелирует с концентрацией добавки, так что сознательное регулирование

содержания наполнителя становится способом настройки нужных параметров, а собранные данные обеспечивают разработчиков ясными направлениями для синтеза следующих поколений композитов.

Гибридизация. Особый интерес представляют гибридные композиты, сочетающие металлические и неметаллические компоненты, которые относятся к динамично развивающейся группе материалов [1] и находят всё более широкое применение в различных отраслях промышленности.

В ходе исследования композиционных материалов на основе диацетата целлюлозы, армированных древесным наполнителем, было выявлено, что при увеличении содержания наполнителя до 20%, происходит рост предела прочности при растяжении и модуля упругости, которые достигают значений 23,0 МПа и 1,22 ГПа соответственно, что говорит об упрочняющем эффекте наполнителя в данной концентрации.

При дальнейшем повышении содержания наполнителя в диапазоне от 30 до 70% наблюдалось снижение как предела прочности при растяжении, так и модуля упругости, что свидетельствует о том, что чрезмерное наполнение ведёт к ухудшению механических характеристик. Так, при увеличении содержания наполнителя с 10 до 70% предел прочности при изгибе снижался с 34,4 до 13,6 МПа, что указывает на сложную зависимость свойств композита от количества введённого наполнителя.

Применение гидродинамически обработанных древесных частиц в качестве наполнителя для композитов [8] на основе диацетата целлюлозы показало, что оптимальная концентрация таких частиц составляет 20–30%, и именно в этом диапазоне достигается наилучшее сочетание свойств.

Наполнитель из древесины в больших количествах обеспечивает композиту меньшую убыль массы во время нагрева, и это доказывает возрастание его термической стабильности, так что материал теперь можно рассматривать для работы в условиях повышенных температурных нагрузок.

Гибридная многослойная структура с углеродными и стеклянными волокнами продемонстрировала лучшие показатели ударной вязкости, и её энергоёмкость при разрушении минимум на треть выше, чем у композита только с углеродным наполнителем. Это соединение формирует равновесный набор параметров, поэтому готовый композит справляется и с длительными статическими усилиями, и с быстрыми динамическими импульсами. Использование гибридных связующих с двумя разнородными составляющими даёт разработчикам эффективный инструмент для [9] решения эксплуатационных задач, и такое объединение компонентов обеспечивает прирост механических качеств и практической ценности материалов в широком диапазоне рабочих режимов.

Инновационные технологии повышения свойств. К новейшим инструментам развития композитов можно отнести СВЧ-обработку,

поверхностную модификацию волокнистых наполнителей и аддитивные технологии. Их интеграция в промышленность позволяет значительно улучшить механические и физические параметры материалов. Данные методы позволяют сократить технологический цикл, повысить точность геометрии изделий и обеспечить более стабильное качество конечной продукции. В совокупности это создаёт основу для выпуска высокотехнологичной продукции, востребованной в аэрокосмической, автомобильной и энергетической отраслях.

Одним из ключевых наблюдений, сделанных в ходе анализа эффективности СВЧ-модификации, является тот факт, что наиболее ощутимый прирост характеристик приходится на жёсткость отдельного армирующего слоя, и именно это обстоятельство делает рассматриваемый метод особенно востребованным при разработке конструкций, где сочетание повышенной жёсткости и достаточной прочности выступает в качестве одного из главных проектных требований, определяющих выбор материала и технологии его обработки.

Поверхностная модификация армирующих волокон приводит к обогащению их поверхности гидроксильными группами, за счёт чего существенно активизируются процессы химического связывания с полимерным связующим, и в результате такого усиления межмолекулярного взаимодействия заметно улучшаются адгезионные характеристики на границе раздела волокно–матрица, что в итоге положительно сказывается на комплексе эксплуатационных свойств композита. По сравнению с исходными образцами улучшение может достигать 22,54%, что подтверждает практическую ценность такого подхода для изготовления высокопрочных материалов.

Материалы и методы. Для систематизации актуальных научных знаний о способах повышения свойств композиционных материалов был выполнен обзор литературы за период 2021–2025 годов. Анализу подверглись работы из авторитетных рецензируемых журналов, материалов профильных конференций и патентной документации, представленных в базах данных КиберЛенинка, РИНЦ, ScienceDirect, Scopus и Web of Science. При отборе научных работ для анализа использовались только те исследования, которые содержат экспериментальные или численные данные по улучшению свойств композиционных материалов, при этом публикации должны быть на русском языке, содержать количественные показатели улучшения механических, термических или функциональных свойств и быть опубликованы в период 2021–2025 годов.

Методология проведённого анализа включала четыре основных этапа.

1. Выделение четырёх ключевых направлений улучшения свойств композитов: наномодифицирование, гибридизация, поверхностная обработка и СВЧ-модификация [7].

2. Систематизация основных методов, количественных результатов улучшения свойств и механизмы модификации [7].

3. Сравнительный анализ эффективности различных методов на основе количественных критериев [7].

4. Выявление синергетических эффектов при совместном применении методов [7].

Количественные показатели улучшения свойств. Применение углеродных нанотрубок и фуллеренов для наномодифицирования композитов, позволяет добиться наиболее высоких показателей улучшения механических свойств. Так, модифицирование матрицы фуллеренами увеличивает предел прочности при сжатии на 31%, комплексная добавка в концентрации 2,6 массовых частей повышает прочность при растяжении на 35%, а при содержании 53,3 массовых частей прочность при изгибе возрастает на 12%.

Диапазон введения комплексной добавки от 2,6 до 16 массовых частей даёт одинаково надёжный прирост разрывной прочности на 30–35%, и наномодифицирование выходит в лидеры среди технологий, направленных на усиление механических параметров композитов.

Сочетание волокон разного происхождения в одном армирующем наполнителе даёт реальные результаты, и этот метод получил надёжное количественное подтверждение в сериях испытаний.

Содержание древесных частиц на уровне двадцати процентов даёт предел прочности при растяжении 23,0 МПа и модуль 1,22 ГПа, а оптимизация расположения слоёв увеличивает сопротивление изгибу почти на 49%. Гибридные материалы с углеродным и стекловолокнистым армированием превосходят чисто углеродные по ударному энергопоглощению на 33%, и помещение порошкового волокна во внутренние слои даёт прирост ударной прочности на 21,6 %.

Широкая востребованность гибридных композитов подтверждена практикой, и СВЧ-активация даёт им дополнительный импульс к совершенствованию, поскольку прочность на разрыв увеличивается со 163 до 182,4 МПа, а сопротивление изгибу с 1,34 до 1,57 МПа, и столь выраженная положительная перестройка характеристик однозначно говорит об упрочнении всей системы. Чередование стекловолокнистых и древесных слоёв в гибридных многослойных системах ведёт к сокращению теплопроводности на 15,9% и это сокращение существенно усиливает теплоизоляционную функцию материала, благодаря чему его применение становится оправданным в конструкциях, предъявляющих повышенные требования к сдерживанию тепловых потерь.

Механические свойства композитов при различных методах модификации. Чистый диацетат целлюлозы [8] поглощает влагу лишь в объёме примерно 4%, однако добавление древесного наполнителя неизбежно сопровождается ухудшением влагостойкости, которая снижается тем сильнее, чем выше содержание наполнителя. Прочность на изгиб демонстрирует устойчивую тенденцию к падению с 34,4 до 13,6 МПа при изменении содержания наполнителя от 10 до 70%, и данная закономерность однозначно указывает на то, что существует некий оптимальный диапазон наполнения, позволяющий достичь разумного компромисса между механическими свойствами и водостойкостью, и поиск этого диапазона выступает в качестве одной из центральных задач при разработке состава композита.

Перспективы промышленного применения диацетатцеллюлозных композитов напрямую зависят от корректного подбора объёмной доли древесного наполнителя, и именно гидродинамически обработанные частицы при их содержании в пределах 20–30% создают ту оптимальную конфигурацию характеристик, при которой прочность при изгибе и водостойкость вступают в разумное равновесие, что делает такие материалы практически полезными для решения различных инженерно-технических задач.

Сравнительная эффективность методов. Экспериментальные данные свидетельствуют о достаточной эффективности всех рассмотренных приёмов упрочнения композитов, тем не менее решающее слово при выборе метода остаётся за комплексом конструктивных особенностей проектируемого изделия и набором эксплуатационных факторов, которые будут определять реальную работу материала в условиях непосредственного применения. Геометрия детали, способы её соединения с соседними элементами и ожидаемые пиковые нагрузки могут перечеркнуть преимущества даже самого перспективного метода. Эксплуатационная обстановка вносит свои коррективы: перепады температур, агрессивные среды, вибрации или ударные импульсы требуют от композита разных акцентов в наборе свойств. В итоге разработчик должен найти то единственное решение, которое удовлетворит все перечисленные требования одновременно, и это делает процесс выбора не столько научным, сколько инженерно-компромиссным.

СВЧ-обработка и модификация поверхности являются наиболее экономичными из всех рассмотренных методов. Они недороги, и их можно интегрировать в уже работающие производственные цепочки без крупных инвестиций.

Синергетические эффекты. Совместное применение различных методов модификации считается многообещающим подходом, позволяющим достичь синергетического эффекта, при котором совокупный результат превосходит сумму эффектов отдельных методов, что подтверждено рядом

експериментальных исследований. Например, если одновременно провести поверхностную обработку волокон и ввести наномодификатор в матрицу, то улучшается как адгезия на межфазной границе, так и прочность самой матрицы, а это обеспечивает комплексное повышение эксплуатационных показателей.

Подобный синергетический эффект даёт и мультимасштабное армирование, где сочетание микроволокон с нанонаполнителями увеличивает стойкость к образованию трещин при сохранении высокой прочности, что открывает широкие перспективы для использования в высоконагруженных конструкциях.

Ограничения и вызовы. Достигнутый прогресс, тем не менее, не снимает ряда серьёзных проблем, ограничивающих применение рассмотренных методов в промышленности. Главная из них это агрегация наночастиц при их диспергировании, что не только снижает результат модификации, но и может вызывать дефектообразование внутри материала.

Воспроизводимость конечных характеристик композитов остаётся одной из самых острых проблем в данной области, и корень этого явления лежит в недостаточной унификации производственных режимов, когда каждый технологический цикл вносит свои отклонения, и в итоге образцы из разных партий демонстрируют существенный разброс механических и теплофизических показателей. Отсутствие строгих регламентов по времени обработки, температурам выдержки и условиям смешения порождает ситуацию, где один и тот же рецептурный состав может выдавать результаты, отличающиеся на десятки процентов. Для промышленного внедрения такая нестабильность становится непреодолимым барьером, ведь серийное производство требует предсказуемости каждой единицы продукции. Поэтому, разработка чётких протоколов и стандартных операционных процедур должна идти параллельно с исследованием самих композитов, иначе даже самый удачный состав так и останется лабораторной экзотикой, не готовой к масштабированию.

Заключение. Высокие показатели прироста свойств убеждают в действенности нанонаполнителей, и гибридная схема с волокнами разных типов даёт сбалансированный комплекс прочностных параметров, а выбор оптимального сочетания методов остаётся за исследователем и зависит от конкретных условий эксплуатации.

Выбор удачной схемы чередования слоёв поднимает сопротивление изгибу на 48,5 %, ударную прочность на 21,6–33 % и выводит предел прочности при растяжении на отметку 23,0 МПа, а использование СВЧ-обработки даёт ещё один рычаг влияния, поскольку растягивающее напряжение возрастает на 12 %, а изгибное на 17 %, и самый сильный отклик от такой модификации наблюдается в увеличении жёсткости одиночного слоя.

Улучшение адгезионных свойств на межфазовой границе через активацию поверхности волокон, даёт прирост механических показателей вплоть до 22,54 %, по отношению к исходным композитам, а для материалов с диацетатом целлюлозы, идеальная концентрация древесного наполнителя находится в интервале 20-30%, и эта дозировка выдерживает приемлемое равновесие между механической надёжностью и сопротивлением водным средам, так что разработчик всегда может смещать акцент в ту или иную сторону, варьируя состав в пределах найденного окна и ориентируясь на внешние факторы эксплуатации.

Перспективы исследования. Совокупность полученных результатов и зафиксированные ограничения применяемых способов усиления композитов выделили ряд вопросов, требующих систематического изучения, и каждый из них представляет самостоятельный интерес для последующих научных поисков.

1 Качественное диспергирование наночастиц остаётся ключевым вызовом, и преодолеть его можно только через сочетание мощной ультразвуковой обработки и целенаправленной поверхностной активации углеродных нанотрубок вместе с графеновыми структурами

2. Разработка вычислительных моделей для прогнозирования механических свойств гибридных и мультимасштабных композитов, что позволит сократить время и затраты на экспериментальные исследования [4].

3. Масштабирование технологий и перевод лабораторных методов наномодифицирования и СВЧ-модификации в промышленное производство, с сохранением качества и воспроизводимости свойств [4].

4. Гибридные композиты с нестандартными комбинациями волокнистых наполнителей, нуждаются в систематическом исследовании, и это включает оценку совместимости натуральных волокон с синтетическими, а также оптимизацию их объёмных долей для получения сбалансированного комплекса механических свойств.

5. Исследование методов повышения термостойкости композитов для их применения в экстремальных условиях эксплуатации.

Список литературы:

1. Лавров А. В., Ерасов В. С., Подживотов Н. Ю., Автаев В. В. Оптимизация структуры гибридных композиционных материалов авиационного назначения // Труды ВИАМ. – 2016. – №11 (47). – 7 с. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-7-7 EDN: WXPXSD

2. Хамидуллин, О. Л. Технология производства изделий из композитов: основные и вспомогательные материалы: учебное пособие / О. Л. Хамидуллин, Л. М. Амирова, К. А. Андрианова. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2021. – 256 с.

3. Проблема повышения механических свойств углепластиковых материалов успешно решается в результате введения в полимерное связующее нанопорошков // Русский журнал прикладной агроинженерии. – 2024. – Т. 9, № 2. – С. 45–52.

4. Шакирзянов Ф.Р, Валиев А. И., Сулейманов А. М., Низамов Р. К. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния гибридных композитов // Известия КазГАСУ. – 2023. – №4 (66).

5. Майникова Н.Ф., Ярмизина А.Ю., Трофимов Д.В. и др. Исследование влияния углеродных нанонаполнителей на свойства композитов на основе полипропилена // Пластические массы. – 2020. – № 3-4. – С. 23–25. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-3-4-23-25 EDN: NKQQYZ

6. Хантимиров А.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хозин В.Г. Исследование свойств наномодифицированных древесно-полимерных композитов на основе полиэтилена // Нанотехнологии в строительстве. – 2023. – Т. 15, № 2. – С. 110–116.

7. Чернышов Е. М., Артамонова О. В., Славчева Г. С. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Часть 2. К проблеме концептуальных моделей наномодифицирования структуры // Строительные материалы. – 2014. – №4. – С. 73-83. EDN: SAJLKB

8. Физико-механические свойства композиционных материалов на основе диацетата целлюлозы // Известия вузов. Лесной журнал. – 2025. – № 2(404). – С. 183–199. DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-183-199 EDN: QBUGIK

9. Аксомитный А. А., Панченко С. Л. Изучение влияния древесного наполнителя на температуропроводность композита // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2016. – №1-2 (5).

10. Инновационные технологии повышения свойств композитных материалов // Белгородский государственный технический университет. – 2023. – Т. 2023, №9. DOI: 10.21822/2023-70021

11. Бекренев Н. В., Злобина И. В. СВЧ модификация отвержденных полимерных композиционных материалов, формируемых аддитивными методами // Материалы XIV Всероссийской научной и студенческой конференции с международным участием: Наноструктурные, волокнистые и композиционные материалы. – 2024. – С. 11-12.

12. Алоев В.З, Жирикова З. М, Тарчокова М. А. Эффективность использования нанонаполнителей разных типов в полимерных композитах // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2020. – №4.

УДК 004.415.25

Бутенко В. А., Фанаберов Д. И., Нечаев М. А.
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АРХИТЕКТУРНОГО ПАТТЕРНА ENTITY COMPONENT SYSTEM В СРАВНЕНИИ С КЛАССИЧЕСКИМ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ПОДХОДОМ В ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ИГРОВЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация. В статье рассматривается эффективность архитектурного паттерна Entity Component System (ECS) по сравнению с классическим объектно-ориентированным подходом при разработке высоконагруженных игровых систем. Проанализированы особенности организации данных в памяти и их влияние на производительность приложений. Проведено экспериментальное сравнение реализаций на базе игрового движка Godot Engine 4.5. Результаты показали, что при увеличении количества обрабатываемых объектов, ECS обеспечивает более низкое время кадра, меньшие затраты кэш-памяти процессора и более стабильную частоту кадров по сравнению с объектно-ориентированным подходом, что подтверждает целесообразность применения ECS в проектах с высокой плотностью сущностей.

Ключевые слова. ООП, ECS, Godot, аллокация памяти, кэш-локальность, компьютерные игры, производительность игровых систем, оптимизация.

Введение

Многие современные видеоигры в процессе работы обрабатывают большое количество внутриигровых объектов, состояние которых необходимо обновлять в режиме реального времени. В таких условиях производительность напрямую зависит от организации данных в кэш-памяти процессора устройства. Традиционный объектно-ориентированный подход обеспечивает высокий уровень абстракции и удобство разработки игровых приложений, однако при работе с большими наборами объектов может приводить к снижению эффективности использования кэш-памяти и увеличению затрат мощностей процессора на обработку данных. В связи с этим всё большее распространение получают архитектуры, основанные на принципах проектирования, ориентированного на данных (Data-Oriented Design), одной из наиболее известных реализаций которых является Entity Component System (ECS).

Результаты исследования

Передача информации между уровнями иерархии памяти осуществляется с помощью блоков фиксированного размера, называемых кэш-линиями [1; 2]. В современных процессорах (с архитектурой x86/x64) их стандартный размер составляет 64 байта [3]. То есть при обращении к некому адресу памяти, в кэш процессора переносится выровненный по границе блок

данных размером 64 байта, содержащий запрошенный байт. На практике из данного механизма вытекает важный оптимизационный принцип: если данные расположены последовательно, то одно обращение к участку памяти делает доступными сразу несколько соседних элементов. Этот принцип напрямую связан с важным программным свойством, называемым кэш-локальностью.

Кэш-локальность – свойство программы обращаться к памяти предсказуемым образом, обеспечивающим эффективную работу кэша [1].

Различают два вида локальности:

– Пространственная локальность – при обращении к адресу A высока вероятность последующего обращения к смежным адресам (A+4, A+8 и т.д.). Загрузка кэш-линии блоком в 64 байта непосредственно использует данное свойство: смежные элементы оказываются в кэше совместно с запрошенным.

– Временна́я локальность – при обращении к адресу A высока вероятность его повторного использования в ближайшее время. На основе данного принципа кэш удерживает недавно использованные данные.

В процессе обработки данных процессором, возможны ситуации, когда требуемый блок отсутствует в кэше. Данная ситуацию принято называть кэш-промахом [1]. Процессор вынужден обращаться к RAM. На период ожидания вычислительные блоки ядра простаивают; при массовой обработке объектов накопленные задержки непосредственно увеличивают время кадра.

Классически различают три основных вида промахов:

– Обязательный промах – возникает при первом обращении к данным, ранее не выгружавшимся в кэш. Такой вид промаха нельзя полностью избежать;

– Ёмкостный промах: возникает при превышении рабочим набором данных ёмкости кэша, вследствие чего необходимые данные вытесняются до момента повторного обращения;

– Конфликтный промах: появляется из-за несовершенной организации кэша. Если несколько адресов используют один и тот же набор кэш-линий, при заполнении этого набора одни блоки вытесняют другие. В результате определённые данные могут неожиданно исчезнуть из кэша, даже если общий объём данных меньше объёма кэша.

Обратной ситуацией называется кэш-попадание: запрошенные данные присутствуют в кэше; стоимость доступа определяется неопределённостью содержимого соответствующего уровня кэш-памяти.

Для уменьшения задержек доступа к памяти современные процессоры применяют механизм аппаратной предвыборки: процессор отслеживает регулярность обращений к памяти и заранее загружает вероятно нужные блоки в кэш [1; 2]. Это уменьшает количество кэш-промахов, в особенности при последовательном доступе к массивам. Однако при нерегулярном доступе

(например, обращение по указателям) механизм предвыборки становится намного менее эффективным.

В объектно-ориентированном подходе игровая сущность представляется объектом класса, который объединяет данные и методы их обработки. Для расширения функциональности данного подхода широко используются такие принципы проектирования, как наследование и композиция объектов. Такой подход обеспечивает удобную организацию кода и хорошо подходит для разработки небольших и средних проектов [4]. Так как в ООП каждый экземпляр хранится в памяти отдельно и связи между объектами реализуются через указатели или ссылки, последовательный обход объектов на физическом уровне превращается в цепочку переходов по разным адресам: когда из кэша извлекли одну кэш-линию, нередко оказывается, что в ней содержатся данные только текущего объекта, а следующие объекты лежат в других участках памяти. При каждом новом переходе по указателю уже ранее загруженная кэш-линия не содержит нужных данных, и процессор вынужден выполнять новое обращение к памяти, что увеличивает вероятность кэш-промахов. В результате страдает пропускная способность: процессор тратит ресурсы на малополезные нагрузки, в то время как конвейер процессора простаивает в ожидании данных [1; 2].

Одним из подходов, позволяющих уменьшить влияние указанных проблем, является Entity Component System (ECS). Архитектура ECS основана на разделении данных и логики на три независимые сущности:

– Entity (сущность) – уникальный идентификатор игрового объекта. Как правило, сущность не содержит данных и служит только для объединения компонентов.

– Component (компонент) – структура данных, описывающая отдельное свойство объекта (координаты, скорость, здоровье, параметры анимации и т.д.). Компоненты не содержат бизнес-логики.

– System (система) – модуль, реализующий обработку компонентов определённого типа. Системы выполняют вычисления над данными и обычно не хранят состояние игровых объектов.

В отличие от объектно-ориентированной модели, ECS организует память вокруг компонентов одного типа. ECS обеспечивает более эффективную работу с памятью, размещая компоненты одного типа в непрерывных областях памяти. Соблюдается пространственная локальность данных [5; 6]. Система приводит структуру данных в соответствие с физической организацией памяти процессора. Загрузка одной кэш-линии обеспечивает доступ сразу к целой группе элементов, которые будут востребованы в следующих итерациях. Для массовой обработки в игровых системах – например, при обновлении координат, скоростей, состояний,

параметров анимации или коллизий – такой способ хранения оказывается существенно эффективнее [5].

Для проверки теоретических положений об эффективности архитектурного подхода ECS в сравнении с классическим объектно-ориентированным подходом, было разработано тестовое программное приложение. Эксперимент проводился на базе игрового движка Godot Engine 4.5 с использованием языка программирования C# (среда выполнения .NET 8.0).

Все замеры производились в идентичных системных условиях на базе следующего аппаратного обеспечения:

– Центральный процессор: 12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12450H, 8 ядер, 12 логических потоков;

– Кэш-память ЦП: L1 = 704 КБ, L2 = 7.0 МБ, L3 = 12.0 МБ;

– Оперативная память: 16.0 ГБ;

– Графический ускоритель: NVIDIA GeForce RTX 3050 Ti Laptop GPU;

– Операционная система: Windows 11 Home 64-bit.

В качестве тестовой выборки спроектирована и реализована двумерная симуляция высоконагруженной подсистемы игровых объектов, моделирующая поведение снарядов в игровых сценариях поджанра «Bullet Hell». В данной симуляции присутствуют два вида снарядов, летящих по строго прямой и по синусоидальной траекториям. Симуляция обеспечивала непрерывную обработку динамической группы из 100/1000/2000/4000/8000 активных объектов, объем которой поддерживался в стабильном состоянии за счет постоянной генерации новых сущностей и параллельного удаления снарядов, достигших предельного времени жизни в 4 секунды.

Эксперимент состоял из двух последовательных этапов:

– Выполнение симуляции, где каждый объект представляет собой узел движка (Node2D), управляемый индивидуальным ООП-скриптом.

– Выполнение симуляции в рамках разработанной ECS-архитектуры, где объекты деконструированы до плоских структур данных, обрабатываемых системными массивами.

Каждый тест запускался через 3 секунды после запуска приложения для исключения влияния процессов инициализации объектов на чистоту данных. Период активного сбора метрик составлял 180 секунд непрерывной работы симуляции.

Для снятия показателей использовался специально разработанный для эксперимента изолированный модуль мониторинга. Данный модуль фиксировал такие метрики как среднее время кадра, стабильность частоты кадров, количество нативных узлов в дереве сцены, динамику выделения управляемой памяти .NET и частоту вызовов сборщика мусора. Вертикальная

синхронизация и ограничение частоты кадров верхним порогом были отключены.

В ходе проведения 180-секундного стресс-теста на выборке из 100/1000/2000/4000/8000 одновременно существующих объектов были получены эмпирические данные, демонстрирующие различия в производительности систем. Каждая конфигурация, состоящая из конкретного архитектурного подхода и числом первоначальной выборки объектов, тестировалась в 5 повторных экспериментах. Сводные средние результаты со стандартным отклонением эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительный анализпроизводительности ООП и ECS подходов

Измеряемая метрика	Подход	100 Объектов	1000 Объектов	2000 Объектов	4000 Объектов	8000 Объектов
Среднее время кадра	ООП	1,0052 ± 0,0587 мс	5,3534 ± 0,3087 мс	9,3886 ± 0,4424 мс	20,9516 ± 0,3962 мс	41,4844 ± 0,3105 мс
	ECS	1,0806 ± 0,0431 мс	1,267 ± 0,0826 мс	1,8108 ± 0,1866 мс	2,0518 ± 0,2004 мс	3,9922 ± 0,2956 мс
Аллокации памяти	ООП	2,7 ± 0,0707 мб	13,348 ± 0,0554 мб	25,62 ± 0,1384 мб	48,154 ± 0,2001 мб	87,27 ± 0,1308 мб
	ECS	1,272 ± 0,0512 мб	1,056 ± 0,1199 мб	0,904 ± 0,1258 мб	0,674 ± 0,0817 мб	0,406 ± 0,0581 мб
Стабильность частоты кадров (1% Low)	ООП	2,1848 ± 0,1078 мс	11,2604 ± 0,6964 мс	17,1444 ± 1,5315 мс	37,6162 ± 4,029 мс	77,9266 ± 3,2995 мс
	ECS	2,3476 ± 0,0931 мс	2,6202 ± 0,4512 мс	3,1166 ± 0,1603 мс	3,5872 ± 0,462 мс	7,1392 ± 0,6764 мс
Вызовы сборщика мусора (GC Gen 0)	ООП	0,6 ± 0,5477	2,4 ± 0,8944	4,4 ± 0,5477	8,4 ± 0,5477	14,8 ± 0,4472
	ECS	0	0	0	0	0
Количество узлов в SceneTree	ООП	303	2919 ± 32,8634	5763 ± 84,8528	10899 ± 130,5374	19587 ± 401,5968
	ECS	3	3	3	3	3

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы об эффективности исследуемых архитектурных подходов: при большом количестве объектов среднее время кадра в ECS-подходе значительно ниже, чем в ООП-реализации. Причем чем выше количество объектов, тем отношение среднего время кадров в ООП подходе и ECS подходом больше. Если при 1000 объектов длительность кадра в ООП подходе дольше в 4,2253 раза, то при 8000 объектов в 10,3914 раз. Наглядный рост можно увидеть на логарифмическом графике на рисунке 1.

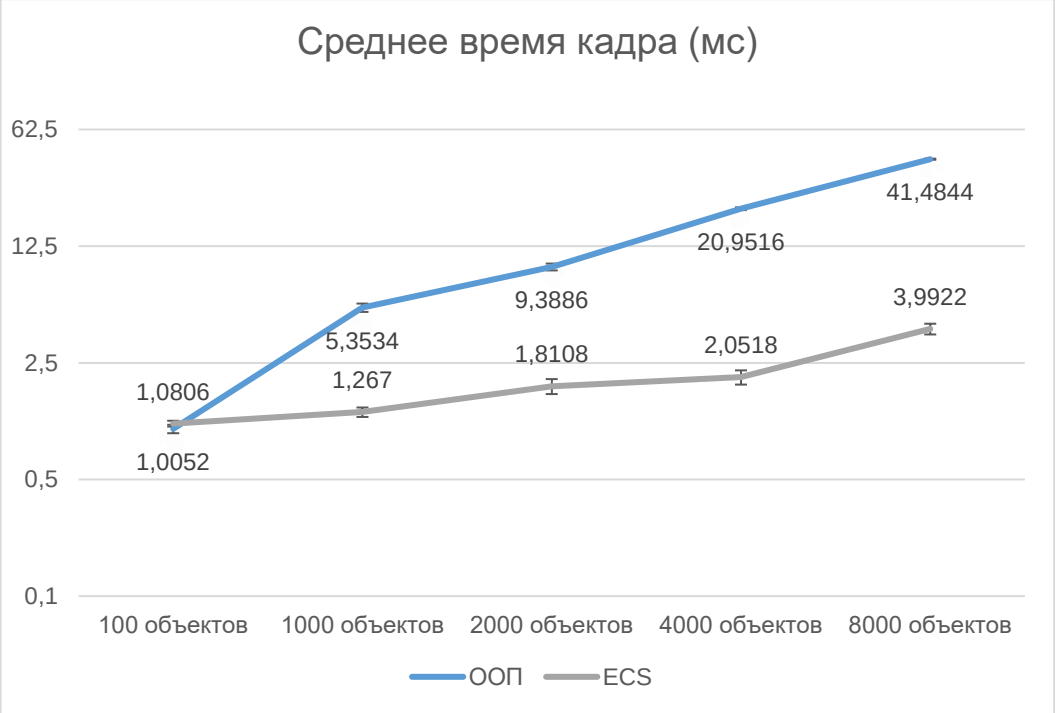


Рисунок 1. Сравнительный логарифмический график среднего времени кадра

Поскольку при большом количестве объектов среднее время кадра в ООП выше, ожидаемо выше и время 1% Low - то есть стабильность хуже, просадки заметнее. Данную разницу можно увидеть на рисунке 2.

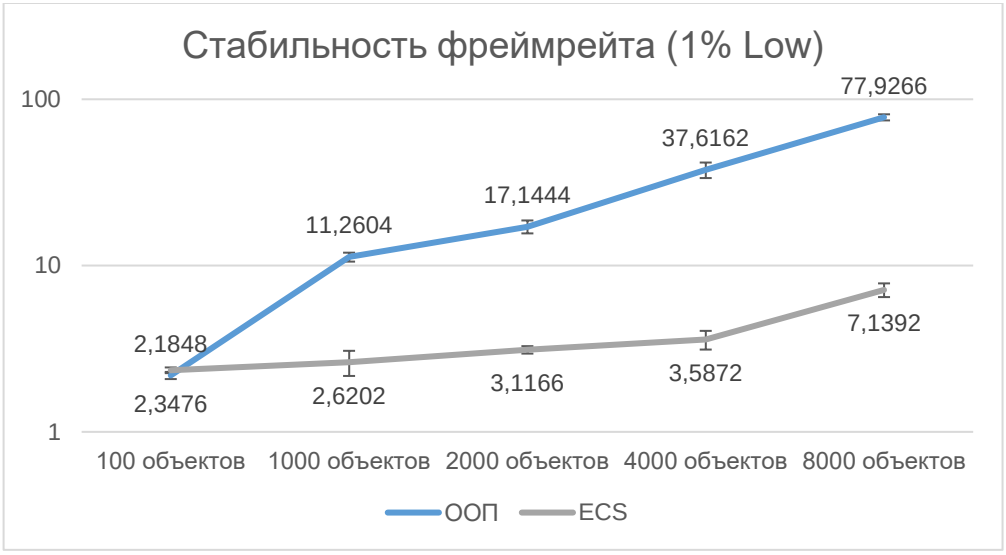


Рисунок 2. Сравнительный логарифмический график стабильности частоты кадров

Разница в количестве узлов дерева сцены демонстрирует один из основных факторов снижения производительности объектно-ориентированной реализации в Godot. Каждый объект Node2D является тяжелой оберткой над C++ ядром движка. При росте числа объектов,

процессор тратит критически много времени на каскадный пересчет матриц трансформаций и итерацию по иерархической структуре SceneTree. В ECS-модели объекта абстрагированы от дерева сцены и отрисовываются пакетно через графический сервер напрямую, что снижает нативный перенагрузка движка.

Частота вызовов сборщика мусора (GC Gen 0) в ООП-версии выше. Постоянное выделение памяти под экземпляры классов в управляемой области памяти может приводить к снижению локальности размещения данных в кэш-памяти процессора и увеличению вероятности кэш-промахов при последовательной обработке большого количества объектов. При обработке процессором это вызывает частые промахи кэша, вынуждая систему обращаться к более медленной оперативной памяти. В ECS-модели данные компонентов располагаются в памяти более компактно и последовательно, что способствует повышению пространственной локальности и более эффективному использованию процессорного кэша.

Полученные результаты подтверждают гипотезу о более высокой эффективности ECS при росте числа однотипных сущностей: преимущество ECS по среднему времени кадра увеличивается с 4,2 раза при 1000 объектах до 10,4 раза при 8000 объектов, сопровождаясь сопоставимым снижением частоты вызовов сборщика мусора и просадок 1% Low.

При малом количестве объектов (100) преимущество ECS-подхода нивелируется: среднее время кадра и показатель 1% Low оказались примерно на 7,5% выше, чем в ООП-реализации. Это позволяет предположить существование диапазона нагрузок, при котором различия между архитектурами становятся несущественными. В рамках проведённого эксперимента данный диапазон находится между 100 и 1000 объектами. Из полученного результата следует, что эффективность ECS-подхода носит пороговый характер и проявляется именно при высокой нагрузке.

Заключение

Проведённое исследование показало, что архитектурный паттерн Entity Component System обладает существенными преимуществами при разработке высоконагруженных игровых систем, обрабатывающих большое количество однотипных объектов. Теоретический анализ показал, что эффективность ECS связана с более высокой локальностью данных и лучшим использованием кэш-памяти процессора благодаря размещению компонентов в непрерывных областях памяти.

Результаты экспериментального исследования подтвердили данные положения. При увеличении количества одновременно обрабатываемых объектов ECS демонстрирует значительное снижение среднего времени кадра, уменьшение числа аллокаций памяти и полное отсутствие вызовов сборщика

мусора в рамках проведённых тестов. Максимальное преимущество по времени кадра составило более десяти раз при обработке 8000 объектов.

В то же время установлено, что при небольшом количестве объектов различия между подходами становятся незначительными, а преимущества ECS начинают проявляться только после достижения определённого уровня нагрузки. Это позволяет сделать вывод о целесообразности применения ECS прежде всего в проектах, ориентированных на массовую обработку игровых сущностей.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что использование архитектуры Entity Component System является эффективным способом повышения производительности игровых приложений при работе с большими объёмами данных и высокой интенсивностью вычислений. Для задач, связанных с обработкой тысяч объектов в реальном времени, ECS может рассматриваться как более предпочтительное решение по сравнению с классическим объектно-ориентированным подходом.

Список литературы:

1. Таненбаум Э., Остин Т. Архитектура компьютера. 6-е изд // СПб.: Питер, 2013. – 816 с.

2. Intel® 64 and IA-32 Architectures Optimization Reference Manual // Intel Corporation. – 2016.

3. Хеннесси Д. Л. Компьютерная архитектура. Количественный подход / Д. Л. Хеннесси, Д. А. Паттерсон; пер. с англ. М. В. Таранчевой, под ред. А. К. Кима. – Изд. 5-е. – Москва: Техносфера, 2016. – 935 с.

4. Гамма, Э. Паттерны объектно-ориентированного проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Дж. Влиссидес // Питер, 2023. – 448 с.

5. Gregory J. Game Engine Architecture. 3rd ed // CRC Press, 2018. – 1240 p. DOI: 10.1201/9781315267845

6. Fabian R. Data-Oriented Design: Software Engineering for Limited Resources and Short Schedules // Richard Fabian, 2018. – 308.

УДК 656.05:311

Сюй Лухань, Комзалов В. И.
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

ТЕХНОЛОГИИ V2X И BIG DATA-ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ МОСКВЫ И ПЕКИНА: ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ

Аннотация: в статье рассматривается опыт внедрения технологий взаимодействия «автомобиль со всем окружающим» (V2X) и интеллектуального прогнозирования транспортных потоков на основе Больших данных (Big Data) в крупнейших агломерациях – Москве и Пекине. Проведен сравнительный анализ инфраструктурных решений, масштабов использования подключенного транспорта и эффективности алгоритмов ИИ. Статья ориентирована на специалистов в области интеллектуальных транспортных систем и прикладного статистического анализа городского трафика.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, V2X, Big Data, прогнозирование трафика, Москва, Пекин, городская логистика.

1. Введение

Современный мегаполис невозможно представить без эффективной транспортной системы. С ростом уровня автомобилизации традиционные методы расширения дорожной сети теряют свою экономическую и пространственную целесообразность. В этих условиях на первый план выходят Интеллектуальные транспортные системы (ИТС), функционирующие на стыке автоматики, связи и вычислительной техники (научная специальность 2.9.8).

Ключевым драйвером развития ИТС в последние годы стали технологии V2X (Vehicle-to-Everything) и предиктивная аналитика больших массивов данных (Big Data). Данное исследование посвящено статистическому сравнению (научная специальность 5.2.3) и оценке опыта внедрения указанных сквозных технологий в Москве и Пекине – двух глобальных лидерах цифровизации городского пространства.

2. Технологическая сущность V2X и статистического Big Data-прогнозирования

Концепция V2X представляет собой экосистему обмена данными в реальном времени. Она включает в себя несколько ключевых каналов связи [4, 5].

1. **V2V (Vehicle-to-Vehicle)** – обмен данными между транспортными средствами для предотвращения столкновений.

2. **V2I (Vehicle-to-Infrastructure)** – связь автомобиля с дорожными объектами (светофорами, знаками, метеостанциями).

3. **V2P (Vehicle-to-Pedestrian)** – фиксация уязвимых участников движения по сигналам их смартфонов.

4. **V2N (Vehicle-to-Network)** – интеграция с облачными навигационными сервисами и городскими центрами управления.

С точки зрения статистической науки (5.2.3), непрерывный поток сообщений от элементов V2X формирует структурированные и неструктурированные временные ряды сверхвысокой плотности. Математические модели ИТС обрабатывают эти Большие данные с помощью методов машинного обучения (нейросети, случайные леса, рекуррентные архитектуры LSTM), выполняя краткосрочное (на 15–30 минут вперед) и среднесрочное прогнозирование матрицы корреспонденций и плотности потока [1, 3].

3. Опыт внедрения ИТС в Москве: централизация и адаптивность

Транспортная система Москвы развивается в рамках единого ИТС-контура, координируемого Центром организации дорожного движения (ЦОДД). Основной упор сделан на агрегацию Big Data от коммерческого флота и государственного транспорта. В Москве функционирует одна из крупнейших в мире сетей парконов, комплексов фотовидеофиксации и детекторов потока.

Статистический анализ трафика в Москве базируется на «цифровом двойнике» города, который аккумулирует треки более чем 300 тысяч подключенных транспортных средств (такси, каршеринг, автобусы Мосгортранса). На основе этих данных алгоритмы прогнозируют загрузку ключевых магистралей (МКАД, ТТК, радиальные шоссе) с точностью до 85%, позволяя адаптивным светофорным объектам менять фазы до того, как затор станет критическим. Технологии непосредственной радиосвязи V2X в настоящее время проходят активные полигонные и точечные испытания [2]. (в Сколково и на отдельных участках магистралей).

4. Опыт внедрения ИТС в Пекине: инфраструктурный масштаб и беспилотники

Пекин демонстрирует иной подход к развитию ИТС, обусловленный национальной стратегией КНР по поддержке беспилотного транспорта (Autonomous Driving) и технологий 5G-V2X (C-V2X). В Пекине акцент смещен со сбора телематики на создание полноценной придорожной инфраструктуры связи.

В специализированных зонах (например, высокотехнологичный район Ичжуан) развернута полномасштабная сеть дорожных модулей (RSU),

които ежесекундно транслируют на бортовые компьютеры автомобилей (OBU) данные о фазах светофоров, препятствиях за углом и плотности потока [6]. Массивы Big Data, собираемые коммерческими гигантами (Baidu, Xiaomi) совместно с правительством Пекина, обрабатываются облачными платформами. Это обеспечивает точность прогнозирования трафика до 90% и позволяет эксплуатировать тысячи коммерческих роботакси и беспилотных доставщиков в общем потоке.

5. Сравнительный анализ систем Москвы и Пекина

Для наглядного сопоставления архитектурных и статистических параметров ИТС двух столиц сформирована сводная аналитическая таблица.

Таблица 1. Сравнительные параметры ИТС и прогнозных систем Москвы и Пекина [7].

Критерий сравнения	**Москва (РФ)**	**Пекин (КНР)**
Доминирующий вектор развития	Централизованное управление трафиком на базе Big Data общего потока.	Создание экосистемы беспилотного транспорта на базе 5G-V2X.
Количество адаптивных светофоров	Более 3 500 объектов.	Более 4 500 объектов с ИИ.
Объем подключенного транспорта	~300 000 ед. (общественный транспорт, такси, каршеринг).	>500 000 ед. (включая личные авто с C-V2X и роботакси).
Технологический стандарт V2X	Стадия тестирования (DSRC / C-V2X), точечные зоны внедрения.	Промышленная эксплуатация (стандарт C-V2X, покрытие целых районов).
Статистическая точность прогноза	До 85% (горизонт планирования – 15–20 минут).	До 90% (интеграция с траекторным прогнозом беспилотников).
Основной социально-экономический эффект	Снижение заторов на 15-20%, предсказуемость графиков НГПТ.	Сокращение задержек на перекрестках до 30%, коммерциализация ИТС.

6. Заключение

Проведенное исследование показало, что Москва и Пекин достигли выдающихся результатов в управлении транспортными системами, используя разные стратегические подходы. Москва сильна своей аналитической базой Big Data и алгоритмами централизованного адаптивного управления городским пассажирским транспортом **[2, 3].** Пекин выступает мировым лидером в части физического развертывания дорожной инфраструктуры V2X и интеграции ИИ с беспилотными системами **[6, 8].**

Дальнейшее развитие ИТС в обеих столицах потребует синергии: Москве необходимо ускорить внедрение стандартов V2X для прямого взаимодействия с автомобилями граждан, а Пекину – продолжать масштабирование локальных зон беспилотного вождения на всю площадь мегаполиса. Интеллектуальная транспортная система (ИТС) Москвы демонстрирует беспрецедентную эффективность в области глубокой вертикальной централизации информационных потоков. Главная сила московского подхода (реализуемого на базе ЦОДД) заключается в создании мощной аналитической базы Big Data и сквозных алгоритмов централизованного адаптивного управления как общим транспортным потоком, так и городским пассажирским транспортом общего пользования. За счет агрегации колоссальных массивов данных со стационарных комплексов фотовидеофиксации, детекторов мониторинга, систем весогабаритного контроля и трекеров коммерческого транспорта (такси, каршеринга, магистральной логистики) Москве удалось построить предиктивную макромодель мегаполиса с горизонтом упреждения заторов до 15–20 минут.

В свою очередь, Пекин выступает неоспоримым мировым лидером в части масштабного физического развертывания придорожной инфраструктуры V2X (в частности, стандарта C-V2X / 5G-V2X) и бесшовной интеграции искусственного интеллекта с высокоавтоматизированными и беспилотными транспортными системами. Китайский подход опирается на децентрализованную архитектуру и периферийные вычисления (Edge Computing). Развертывание плотной сети придорожных блоков (RSU) в специализированных зонах (например, в высокотехнологичном кластере Ичжуан) позволило минимизировать задержку передачи пакетов данных до критических величин менее 5 миллисекунд. Это обеспечило технологический фундамент для безопасного и массового пилотирования беспилотных транспортных средств (BATC) в реальных условиях перенасыщенного городского трафика.

Для транспортного комплекса Москвы ключевым вектором развития на среднесрочную перспективу должно стать ускорение темпов развертывания придорожной инфраструктуры и внедрение единых стандартов V2X для прямого, низколатентного взаимодействия ИТС с бортовыми устройствами автомобилей граждан. Это позволит уйти от исключительно реактивного сбора данных к проактивному микрорегулированию (например, выдаче индивидуальных скоростных рекомендаций Green Light Optimal Speed Advisory, GLOSA).

Для транспортной экосистемы Пекина магистральной задачей остается масштабирование локальных изолированных зон беспилотного вождения на всю географическую площадь мегаполиса. Это сопряжено с необходимостью усложнения математических моделей ИИ для обработки

сверхбольших объемов неструктурированных данных в условиях гетерогенной среды, где беспилотный транспорт должен эффективно взаимодействовать с традиционными транспортными средствами под управлением водителей-людей.

Список литературы:

1. Рахмангулов А.Н., Тянь Ю. Исследование методов «Big Data» для прогнозирования параметров транспортных потоков / А. Н. Рахмангулов, Ю. Тянь // Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова; Харбинский политехнический университет. – Магнитогорск, 2015. – 78 с. EDN: VNRQQB
2. Власов В.М. Транспортная телематика в дорожной отрасли / В. М. Власов, Д. Б. Ефименко, Богумил В.Н. // Московский автомобильно-дорожный государственный технических университет (МАДИ). – 2013. – С. 80. EDN: SGBPGD
3. Рахмангулов А.Н., Копылова О.А. Обзор методов и алгоритмов Big Data для решения задач прогнозирования параметров транспортных потоков и проектирования логистических систем / А.Н. Рахмангулов, О.А. Копылова // Недропользование и транспортные системы. – 2024. – Т. 14, № 2. – С. 4-13.
4. Куприяновский В.П. Интеллектуальная мобильность и мобильность как услуга в умных городах / В. П. Куприяновский, А.В. Акимов, О.Н. Покусаев, В.В. Аленьков, Д.Е. Намиот, С.А. Синягов // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5, № 12. – С. 77–122.
5. Шишкин М. В. Анализ экономических барьеров и возможностей внедрения технологий v2x в транспортную систему Санкт-Петербурга / М. В. Шишкин // Естественно-гуманитарные исследования. – 2025. – № 2 (58). – С. 525–529.
6. Baidu and Tsinghua University introduce Apollo Air to empower autonomous driving with roadside sensing [Электронный ресурс] // Autonomous Vehicle Internatial. – URL: https://www.autonomousvehicleinternational.com/news/v2x-news/baidu-and-tsinghua-university-introduce-apollo-air-to-empower-autonomous-driving-with-roadside-sensing.html (дата обращения: 04.07.26).
7. Sayed S.A., Abdel-Hamid Y., Hefny H.A. Intelligent Traffic Flow Prediction Using Deep Learning Techniques: A Comparative Study / A.S. Sayed, Y. Abdel-Hamid, H. A. Hefny // SN Computer Science. – 2025. – Vol. 6. – 60 p.
8. Chen Y., Qiu Y., Tang Z. et al. Exploring the Synergy of Blockchain, IoT, and Edge Computing in Smart Traffic Management across Urban Landscapes / Y. Chen, Y. Qiu, Z. Tang et al. // Journal of Grid Computing. – 2024. – Vol. 22. – 45 p.

УДК 004.92:004.89

Полетаев Б. Г.
Научный руководитель: Тёплая Н. А., профессор
Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского, Москва, Россия

АДАПТАЦИЯ ДИФФУЗИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ 3D-ОБЪЕКТОВ И СЦЕН

Аннотация. Диффузионные вероятностные модели в последние годы стали одним из наиболее динамично развивающихся направлений генеративного искусственного интеллекта благодаря высокой устойчивости обучения и способности формировать изображения с высокой степенью детализации. Существенный интерес исследователей вызывает расширение возможностей подобных моделей на задачи генерации трехмерных объектов и сцен, поскольку развитие цифрового проектирования, технологий виртуальной и дополненной реальности, робототехники и систем автоматизированного проектирования требует эффективных методов синтеза пространственного контента. Несмотря на значительный прогресс, адаптация диффузионных моделей к работе с трехмерными представлениями сопровождается рядом фундаментальных вычислительных и алгоритмических проблем, связанных с высокой размерностью данных, необходимостью обеспечения геометрической согласованности и значительными требованиями к вычислительным ресурсам. В работе рассматриваются современные методы генерации трехмерного контента на основе диффузионных моделей, анализируются подходы к оптимизации вычислений, включая дистилляцию знаний, структурный прунинг, латентную генерацию и интеграцию с технологиями Gaussian Splatting. Выполнен обзор современных архитектур и определены перспективные направления дальнейшего развития генеративных систем для синтеза трехмерных объектов и сцен [1–13].

Ключевые слова: диффузионные модели, генеративный искусственный интеллект, трехмерная генерация, Gaussian Splatting, глубокое обучение, оптимизация нейронных сетей, генерация 3D-контента.

Введение

Современный этап развития искусственного интеллекта характеризуется активным совершенствованием генеративных моделей глубокого обучения, которые позволяют автоматически создавать изображения, видео, трехмерные объекты и другие виды цифрового контента. Наиболее существенный прогресс в данной области связан с развитием диффузионных вероятностных моделей, продемонстрировавших превосходство над большинством ранее существовавших генеративных архитектур по качеству синтеза изображений и устойчивости процесса обучения [1–3].

В отличие от генеративно-состязательных сетей, обучение которых сопровождается проблемами нестабильности и коллапса мод, диффузионные

модели основываются на последователном моделировании процесса постепенного зашумления исходных данных и обратного восстановления структуры объекта. Такой подход обеспечивает более точное моделирование распределения данных и позволяет получать изображения с высокой степенью реалистичности, детализации и разнообразия [1, 2]. Использование латентного пространства значително повысило вычислительную эффективность подобных моделей, что способствовало широкому распространению технологий генерации изображений по текстовым описаниям [3].

Несмотря на значительные достижения в области двумерной генерации, развитие современных цифровых технологий требует перехода к автоматическому созданию трехмерных моделей. Подобные технологии востребованы в архитектурном проектировании, промышленном дизайне, компьютерных играх, кинематографе, медицине, робототехнике и системах цифровых двойников. В отличие от двумерных изображений трехмерные объекты должны обладать пространственной согласованностью, корректной геометрией и возможностью визуализации с произвольной точки наблюдения, что существенно усложняет процесс генерации [4–7].

Первые успешные исследования в данной области продемонстрировали возможность использования предварительно обученных двумерных диффузионных моделей для оптимизации трехмерной геометрии посредством метода Score Distillation Sampling. Архитектура DreamFusion стала одной из первых систем, позволивших генерировать трехмерные объекты исключительно по текстовому описанию без необходимости обучения специализированной трехмерной модели [4]. Дальнейшее развитие данного направления привело к появлению Magic3D, обеспечивающей значительное повышение качества создаваемых моделей за счет двухэтапной оптимизации и использования изображений высокого разрешения [5]. Одновременно были разработаны методы Zero-1-to-3 и ProlificDreamer, существенно повысившие качество генерации и устойчивость процесса оптимизации [6, 7].

Наряду с совершенствованием алгоритмов генерации активно развиваются технологии пространственного представления данных. Одним из наиболее перспективных направлений стала технология 3D Gaussian Splatting, позволяющая отказаться от традиционных полигональных представлений в пользу множества трехмерных гауссовых примитивов. Подобное представление обеспечивает высокую скорость визуализации, эффективное использование вычислительных ресурсов и возможность интеграции с современными генеративными архитектурами [8–10]. Последующие исследования продемонстрировали возможность непосредственного использования диффузионных моделей для генерации Gaussian-представлений, что позволило существенно сократить время построения трехмерных сцен и повысить качество реконструкции [10, 11].

Несмотря на достигнутые результаты, практическое применение диффузионных моделей в задачах трехмерной генерации по-прежнему ограничивается высокой вычислительной сложностью. Большинство современных моделей требуют десятков последовательных итераций денойзинга, значительного объема видеопамяти и продолжительного времени инференса. Дополнительные сложности связаны с необходимостью обеспечения физической корректности поверхностей, устранения самопересечений и сохранения семантической согласованности объекта при наблюдении с различных ракурсов [8, 9, 12, 13].

В связи с этим особую актуальность приобретает разработка методов оптимизации генеративных моделей, направленных на сокращение вычислительных затрат без существенного ухудшения качества синтезируемого контента. Современные исследования в данной области сосредоточены на применении методов дистилляции знаний, структурного прунинга, латентной генерации, ускоренного семплирования и повторного использования промежуточных вычислений, что позволяет значительно повысить практическую эффективность генеративных систем [3, 7–13].

Целью настоящего исследования является анализ современных методов адаптации диффузионных вероятностных моделей к генерации трехмерных объектов и сцен, а также исследование существующих подходов к повышению вычислительной эффективности подобных архитектур. Особое внимание уделяется современным методам пространственного представления данных, технологиям Gaussian Splatting и перспективным направлениям развития генеративных моделей нового поколения [8–13].

2. Теоретические основы диффузионных моделей

Диффузионные вероятностные модели представляют собой класс генеративных моделей, основанных на моделировании последовательного стохастического процесса преобразования исходных данных. Основная идея заключается в том, что сложное распределение обучающей выборки может быть восстановлено посредством обратного процесса удаления случайного шума, если нейронная сеть способна корректно оценивать направление восстановления исходной структуры объекта. Данный подход был впервые формализован в работе J. Sohl-Dickstein и соавторов, где процесс генерации рассматривался как обратная задача по отношению к термодинамическому процессу диффузии [1].

В дальнейшем архитектура получила существенное развитие благодаря модели Denoising Diffusion Probabilistic Models (DDPM), предложенной J. Ho и соавторами. В данной работе было показано, что обучение нейронной сети предсказанию добавленного шума позволяет значительно упростить процесс оптимизации и одновременно обеспечить высокое качество синтезируемых данных. По сравнению с генеративно-состязательными сетями диффузионные

модели характеризуются более устойчивым обучением, отсутствием коллапса мод и высокой воспроизводимостью результатов [2].

Формално процесс генерации включает две взаимосвязанные стадии. На первом этапе осуществляется прямая диффузия, в ходе которой к исходным данным постепенно добавляется гауссов шум. После большого количества итераций распределение исходных данных практически совпадает с нормальным распределением. На втором этапе обученная нейронная сеть выполняет обратный процесс, последовательно устраняя шум и восстанавливая первоначальную структуру объекта. Именно качество моделирования обратной диффузии определяет реалистичность получаемого результата [1, 2].

Практическое распространение диффузионных моделей стало возможным после появления архитектуры Latent Diffusion Models, предложенной R. Rombach и соавторами. Авторы показали, что выполнение процесса диффузии непосредственно в латентном пространстве существенно уменьшает вычислительные затраты без заметного ухудшения качества синтеза. Вместо обработки изображений полного разрешения модель выполняет генерацию компактного скрытого представления, которое впоследствии декодируется в итоговое изображение. Подобный подход позволил значительно сократить требования к памяти графических процессоров и увеличить скорость инференса [3].

Еще одним важным преимуществом современных диффузионных моделей является возможность условной генерации. В отличие от первых генеративных моделей, создававших случайные изображения без возможности управления содержанием, современные архитектуры способны учитывать различные типы входной информации. В качестве условий могут использоваться текстовые описания, изображения, карты глубины, семантические маски, пространственные ограничения и другие модальности. Благодаря этому пользователь получает возможность непосредственно управлять процессом генерации, задавая характеристики будущего объекта естественным языком либо посредством дополнительных визуальных данных [3–5].

Развитие методов условной генерации стало фундаментальной предпосылкой перехода от двумерного синтеза изображений к построению трехмерных моделей. Если текстовое описание позволяет определить внешний вид объекта, то дополнительная оптимизация пространственной структуры обеспечивает согласованность геометрии при наблюдении с различных ракурсов. Именно сочетание этих подходов легло в основу большинства современных методов генерации трехмерного контента [4–7].

Следует отметить, что переход от двумерного пространства к трехмерному существенно усложняет математическую постановку задачи. Изображение представляет собой регулярную двумерную сетку пикселей, тогда как трехмерные объекты могут быть описаны различными представлениями, каждое из которых

обладает собственными преимуществами и ограничениями. Наиболее распространенными являются воксельные модели, облака точек, полигональные сетки, нейронные поля плотности (NeRF), неявные функции расстояния и представления на основе трехмерных гауссовых примитивов. Выбор способа кодирования непосредственно влияет как на качество генерации, так и на вычислительную сложность всей модели [8, 9, 12].

По этой причине современные исследования сосредоточены не только на совершенствовании алгоритмов диффузии, но и на поиске наиболее эффективных способов пространственного представления информации. Современные архитектуры стремятся объединить преимущества вероятностной генерации, латентного кодирования и компактного описания трехмерной геометрии, обеспечивая одновременно высокое качество синтеза и приемлемые вычислительные затраты [9–13].

3. Современные методы адаптации диффузионных моделей для генерации трёхмерных объектов

Использование диффузионных моделей для синтеза трехмерных объектов требует принципиального изменения традиционной схемы генерации изображений. Если в двумерном случае достаточно сформировать единственную визуально правдоподобную проекцию, то трехмерная модель должна сохранять пространственную согласованность независимо от направления наблюдения. Это обстоятельство существенно усложняет процесс обучения и предъявляет дополнительные требования к архитектуре нейронной сети [4, 5].

Одним из первых успешных решений данной задачи стала архитектура DreamFusion, основанная на использовании предварительно обученной двумерной диффузионной модели в качестве функции оценки качества трехмерной реконструкции. В данной системе текстовое описание преобразуется в набор ограничений, позволяющих оптимизировать параметры нейронного представления сцены посредством метода Score Distillation Sampling. В результате формируется трехмерная модель, визуальные проекции которой соответствуют исходному текстовому запросу [4].

Несмотря на высокий научный интерес, DreamFusion характеризовалась значительными вычислительными затратами. Для генерации одного объекта требовались тысячи итераций оптимизации, что существенно ограничивало практическое применение метода. Решением данной проблемы стала архитектура Magic3D, в которой процесс синтеза был разделен на два последовательных этапа. На первом этапе создавалась грубая геометрия объекта в низком разрешении, после чего выполнялась ее высокоточная детализация с использованием изображений повышенного качества. Подобный подход позволил одновременно повысить скорость генерации и улучшить детализацию создаваемых моделей [5].

Дальнейшее развитие получили методы генерации трехмерных объектов по одному изображению. Архитектура Zero-1-to-3 продемонстрировала возможность

реконструкции пространственной структуры объекта на основе единственного двумерного изображения без использования многовидовых данных. Использование специальных механизмов обучения позволило модели корректно предсказывать внешний вид объекта при изменении угла наблюдения, что значительно расширило возможности практического применения генеративных систем [6].

Существенным этапом развития направления стала модель ProlificDreamer, предложившая вариационную модификацию метода Score Distillation Sampling. Использование вероятностной оптимизации позволило повысить разнообразие синтезируемых объектов, уменьшить вероятность появления артефактов и обеспечить более устойчивое обучение генеративной модели. Благодаря этому качество создаваемых трехмерных объектов приблизилось к уровню профессионального моделирования [7].

Одновременно с развитием методов трехмерной генерации активно совершенствовались способы представления пространственной информации. Наиболее заметным достижением последних лет стало появление технологии 3D Gaussian Splatting, предложенной B. Kerbl и соавторами. В отличие от традиционных нейронных полей плотности данный подход описывает сцену как совокупность трехмерных гауссовых примитивов с оптимизируемыми параметрами положения, формы, прозрачности и цвета. Такое представление обеспечивает значительно более высокую скорость визуализации при сохранении качества реконструкции [8].

В последующих исследованиях Gaussian Splatting был интегрирован непосредственно с диффузионными моделями, что привело к появлению новых направлений, включая DiffGS и DiffSplat. Подобные архитектуры позволяют выполнять генерацию трехмерных представлений непосредственно в пространстве гауссовых примитивов, существенно сокращая время построения сцены и улучшая качество получаемой геометрии. Современные исследования демонстрируют, что данный подход становится одним из наиболее перспективных направлений дальнейшего развития генеративного моделирования трехмерных объектов [9–13].

4. Методы оптимизации диффузионных моделей для генерации трехмерного контента

Несмотря на высокое качество результатов, современные диффузионные модели остаются одними из наиболее ресурсоемких генеративных архитектур. Причиной этого является необходимость последовательного выполнения большого числа шагов обратной диффузии, каждый из которых требует полного прохождения данных через глубокую нейронную сеть. При генерации трехмерных объектов вычислительная нагрузка дополнительно возрастает вследствие необходимости многократного рендеринга сцены с различных

ракурсов, оптимизации пространственной геометрии и обеспечения согласованности между различными представлениями объекта [3–5, 13].

В связи с этим одной из ключевых задач современного этапа развития генеративного искусственного интеллекта становится разработка методов оптимизации, позволяющих сократить вычислительные затраты без существенного ухудшения качества синтезируемого контента. Современные исследования развиваются по нескольким взаимодополняющим направлениям, включающим дистилляцию знаний, структурное упрощение архитектуры, ускорение процедуры семплирования и совершенствование пространственного представления данных [7–13].

4.1. Дистилляция знаний

Одним из наиболее эффективных методов уменьшения вычислительной сложности является дистилляция знаний (Knowledge Distillation). Данный подход предполагает перенос информации, накопленной крупной предварительно обученной моделью, в более компактную нейронную сеть. При этом модель-ученик обучается воспроизводить поведение модели-учителя, сохраняя основные закономерности распределения данных при значительно меньшем количестве параметров [3, 7].

В диффузионных моделях дистилляция обладает рядом особенностей. В отличие от классических задач классификации здесь необходимо обеспечить воспроизведение не только итогового результата генерации, но и всей последовательности обратной диффузии. Для этого используются специальные функции потерь, минимизирующие различия между промежуточными состояниями процесса денойзинга. Такой подход позволяет уменьшить число параметров модели и одновременно сократить количество шагов генерации без выраженной деградации качества изображений или трехмерных объектов [7].

Особое значение данный метод приобретает при генерации трехмерного контента, поскольку вычислительная стоимость каждой итерации значительно выше по сравнению с синтезом двумерных изображений. Использование компактных моделей позволяет снизить требования к объему видеопамяти и делает возможным применение генеративных систем на менее производительном оборудовании, что существенно расширяет область их практического использования [7, 13].

4.2. Структурный прунинг и сокращение сложности архитектуры

Другим распространенным направлением оптимизации является структурный прунинг, представляющий собой удаление элементов нейронной сети, оказывающих минимальное влияние на качество генерации. Современные исследования показывают, что после завершения обучения значительная часть параметров модели характеризуется низкой информативностью и может быть исключена без существенного ухудшения итогового результата [3, 13].

В отличие от неструктурированного прунинга, удаляющего отдельные веса нейронной сети, структурный подход исключает целые каналы, блоки внимания либо сверточные фильтры. Благодаря этому сокращается не только размер модели, но и фактическое время вычислений на современных графических процессорах. Практические исследования демонстрируют возможность существенного уменьшения числа операций при сохранении высокой точности генерации [9, 13].

При генерации трехмерных объектов применение структурного прунинга имеет дополнительное преимущество, поскольку позволяет уменьшить объем памяти, необходимой для хранения промежуточных представлений сцены. Это особенно важно при работе с высокодетализированными объектами, количество пространственных элементов которых значительно превышает размерность традиционных двумерных изображений [8–10].

4.3. Латентная диффузия и сокращение размерности данных

Существенный вклад в повышение эффективности генеративных моделей внесла концепция латентной диффузии. Вместо непосредственной обработки исходных изображений или трехмерных представлений генерация осуществляется в компактном скрытом пространстве значительно меньшей размерности. После завершения процесса диффузии латентное представление декодируется в итоговый объект [3].

Использование латентного пространства позволяет существенно сократить объем вычислений, уменьшить требования к памяти и ускорить процесс обучения. Именно данная концепция лежит в основе большинства современных генеративных моделей и активно применяется при разработке алгоритмов трехмерной генерации [3–5].

Дополнительным преимуществом латентной диффузии является возможность интеграции с различными способами пространственного представления информации. Современные исследования демонстрируют успешное применение данного подхода совместно с нейронными полями плотности, Gaussian Splatting и другими методами трехмерной реконструкции [8–13].

4.4. Ускорение процедуры генерации

Помимо уменьшения размера моделей значительное внимание уделяется сокращению количества итераций обратной диффузии. Классические архитектуры могут использовать несколько десятков последовательных шагов денойзинга, что существенно увеличивает время инференса. Современные методы оптимизации направлены на получение сопоставимого качества при значительно меньшем числе итераций [2, 3].

Одним из наиболее эффективных подходов является повторное использование промежуточных вычислений. Анализ показывает, что соседние этапы обратной диффузии характеризуются высокой степенью сходства

внутренних представлений. Это позволяет сохранять часть промежуточных активаций и использовать их повторно без выполнения полного пересчета нейронной сети. Подобный механизм существенно сокращает вычислительные затраты и практически не оказывает отрицательного влияния на качество генерации [13].

Другим перспективным направлением является совершенствование алгоритмов семплирования. Современные методы позволяют получать качественные результаты за значительно меньшее число шагов по сравнению с первоначальными реализациями диффузионных моделей. Это особенно важно при генерации трехмерных объектов, где каждая дополнительная итерация сопровождается повторным рендерингом пространственной сцены и увеличением общего времени вычислений [2, 7, 13].

5. Современные архитектурные решения для генерации трехмерных объектов

Развитие генеративных моделей сопровождается постоянным совершенствованием способов пространственного представления трехмерной информации. Если первые методы были ориентированы преимущественно на использование нейронных полей плотности, то современные исследования все чаще используют более компактные и вычислительно эффективные представления [4–8].

Одним из наиболее значимых достижений последних лет является технология 3D Gaussian Splatting, предложенная Kerbl и соавторами. В отличие от традиционных методов реконструкции сцена описывается не непрерывной функцией плотности, а множеством трехмерных гауссовых примитивов, параметры которых оптимизируются в процессе обучения. Благодаря этому достигается высокая скорость визуализации при сохранении качества реконструкции, сопоставимого с современными методами NeRF [8].

Дальнейшее развитие направления привело к появлению методов DiffGS и DiffSplat, объединяющих преимущества Gaussian Splatting с возможностями диффузионных моделей. Подобные архитектуры позволяют выполнять генерацию трехмерных сцен непосредственно в пространстве гауссовых примитивов, исключая трудоемкий этап последующей реконструкции. Экспериментальные исследования показывают, что такой подход обеспечивает более высокую скорость генерации, лучшую детализацию поверхностей и более устойчивое восстановление сложных пространственных структур [9–11].

Современные обзорные исследования свидетельствуют о том, что дальнейшее развитие генеративных моделей будет связано именно с интеграцией вероятностной генерации, компактных пространственных представлений и специализированных архитектур, ориентированных на обработку трехмерных данных. Подобная интеграция позволит существенно повысить эффективность

генерации, снизить требования к вычислительным ресурсам и расширить область практического применения генеративного искусственного интеллекта [12, 13].

6. Практические результаты применения диффузионных моделей в задачах трехмерной генерации

Современные исследования демонстрируют, что использование диффузионных моделей позволяет существенно расширить возможности автоматизированного построения трехмерных объектов по сравнению с традиционными алгоритмами компьютерной графики. Если ранние методы реконструкции требовали большого количества фотографий объекта, наличия заранее подготовленных трехмерных моделей либо ручного моделирования геометрии, то современные генеративные архитектуры способны синтезировать пространственные объекты на основе текстового описания или одного исходного изображения [4–7].

Наиболее распространенным направлением практического применения является генерация трехмерных моделей по текстовым запросам. В подобных системах текст сначала преобразуется в семантическое представление при помощи языкового энкодера, после чего используется в качестве условия для процесса обратной диффузии. Итогом работы модели становится трехмерная геометрия, соответствующая содержанию пользовательского описания. Такой подход существенно сокращает продолжительность проектирования цифровых объектов и открывает новые возможности для автоматизации процессов промышленного дизайна, архитектурного моделирования и разработки цифрового контента [4, 5, 7].

Другим перспективным направлением является реконструкция пространственной сцены по одному изображению. Современные модели способны восстанавливать недостающую информацию о геометрии объекта, прогнозировать внешний вид скрытых поверхностей и формировать трехмерное представление, пригодное для дальнейшей визуализации с произвольных ракурсов. Развитие данного направления имеет особое значение для робототехники, автономных транспортных систем и технологий дополненной реальности, где оперативное восстановление трехмерной структуры окружающего пространства является необходимым условием эффективного функционирования интеллектуальных систем [6, 12].

Высокую практическую ценность представляют методы, основанные на технологии Gaussian Splatting. По сравнению с традиционными нейронными полями плотности они обеспечивают значительно более высокую скорость визуализации, уменьшение вычислительной нагрузки и повышение качества отображения сложных пространственных сцен. Это делает возможным применение генеративных моделей в системах интерактивного проектирования, цифровых двойниках промышленных объектов, виртуальной реальности и современных игровых движках [8–11].

Анализ современных исследований показывает, что сочетание латентной диффузии, методов условной генерации и компактных пространственных представлений обеспечивает существенное повышение вычислительной эффективности без заметного ухудшения качества синтезируемого контента. Благодаря этому становится возможным постепенный переход генеративных технологий от экспериментальных исследований к промышленному использованию в задачах инженерного проектирования, медицинской визуализации и автоматизированного создания цифровых объектов [3, 8–13].

7. Основные проблемы и перспективы дальнейших исследований

Несмотря на стремительное развитие диффузионных моделей, их практическое применение для генерации трехмерного контента сопровождается рядом нерешенных научных и инженерных проблем. Одной из наиболее существенных остается высокая вычислительная сложность обучения и инференса. Даже современные методы оптимизации требуют использования производительных графических ускорителей и значительного объема видеопамяти, что существенно ограничивает возможности массового внедрения подобных технологий [3, 8, 13].

Второй важной проблемой является обеспечение геометрической корректности синтезируемых объектов. Несмотря на высокий уровень визуального качества, современные генеративные модели по-прежнему могут создавать поверхности с самопересечениями, нарушенной топологией либо некорректной внутренней структурой. Особенно заметными подобные недостатки становятся при создании сложных инженерных изделий, архитектурных объектов и технических конструкций, где предъявляются повышенные требования к точности пространственного моделирования [5, 8, 12].

Не менее важной задачей остается совершенствование механизмов управления процессом генерации. Хотя современные модели способны учитывать текстовые запросы, степень контроля над отдельными геометрическими характеристиками объекта пока остается ограниченной. Перспективным направлением исследований является разработка методов многомодальной генерации, объединяющих текстовые описания, изображения, пространственные ограничения, эскизы и инженерные параметры в рамках единого процесса синтеза [4–7, 13].

Отдельное направление развития связано с дальнейшей интеграцией диффузионных моделей и технологий Gaussian Splatting. Современные исследования свидетельствуют о высокой эффективности подобных архитектур, однако существующие методы находятся на начальном этапе развития и требуют дальнейшего совершенствования алгоритмов генерации, оптимизации памяти и повышения устойчивости обучения. Ожидается, что именно данное направление станет одной из ключевых областей развития генеративного искусственного интеллекта в ближайшие годы [8–13].

Заключение

Проведенный анализ показывает, что диффузионные вероятностные модели сформировали новое направление развития генеративного искусственного интеллекта, обеспечив качественный переход от традиционных методов синтеза изображений к интеллектуальным системам автоматического создания трехмерного контента [1–3]. Использование вероятностного моделирования, латентного пространства и механизмов условной генерации позволило существенно повысить качество синтезируемых объектов и обеспечить устойчивость процесса обучения по сравнению с ранее применявшимися генеративными архитектурами.

Развитие методов DreamFusion, Magic3D, Zero-1-to-3 и ProlificDreamer продемонстрировало возможность генерации сложных трехмерных объектов на основе текстового описания и ограниченного количества визуальных данных. Одновременно появление технологии 3D Gaussian Splatting стало важным этапом совершенствования пространственных представлений, обеспечив значительное повышение скорости визуализации и качества реконструкции трехмерных сцен.

Показано, что повышение вычислительной эффективности современных генеративных моделей достигается за счет комплексного применения методов латентной диффузии, дистилляции знаний, структурного прунинга, ускоренного семплирования и новых способов пространственного представления информации. Совместное использование перечисленных методов позволяет существенно уменьшить вычислительные затраты без заметной потери качества генерируемого контента, что расширяет возможности практического внедрения генеративных технологий в инженерные и научные приложения.

В перспективе дальнейшее развитие рассматриваемого направления будет связано с созданием универсальных генеративных архитектур, объединяющих вероятностные модели, многомодальные механизмы управления, технологии трехмерной реконструкции и высокоэффективные пространственные представления. Решение данных задач позволит значительно расширить применение генеративного искусственного интеллекта в промышленном проектировании, робототехнике, архитектуре, медицинской визуализации и системах цифровых двойников.

Список литературы:

1. Sohl-Dickstein J. Deep Unsupervised Learning using Nonequilibrium Thermodynamics / J. Sohl-Dickstein, E. A. Weiss, N. Maheswaranathan, S. Ganguli // Proceedings of the 31st Inter-national Conference on Machine Learning (ICML-14). – 2014. – P. 604–612.
2. Ho J. Denoising Diffusion Probabilistic Models / J. Ho, A. Jain, P. Abbeel // Advances in Neural Information Processing Systems 33 (NeurIPS 2020). –2020.
3. Rombach R. High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models / R. Rombach, A. Blattmann, D. Lorenz, P. Esser, B. Ommer // IEEE/CVF Conference on Computer

Vision and Pattern Recognition (CVPR), New Orleans, LA, USA. – 2022. – P. 10674–10685. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.01042

4. DreamFusion: Text-to-3D using 2D Diffusion [Electronic resource] // arXiv.org. – URL: https://arxiv.org/abs/2209.14988 (дата обращения: 10.07.26).

5. Lin C.-H. Magic3D: High-Resolution Text-to-3D Content Creation / C.-H. Lin, J. Gao, L. Tang, T. Takikawa, X. Zeng, X. Huang, K. Kreis, S. Fidler, M.-Y. Liu, T.-Y. Lin // EEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Vancouver, BC, Canada, 2023. – P. 300 –309. DOI: 10.1109/CVPR52729.2023.00037

6. Liu R. Zero-1-to-3: Zero-shot One Image to 3D Object / R. Liu, R. Wu, B. Van Hoorick, P. Tokmakov, S. Zakharov, C. Vondrick // EEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), Paris, France, 2023. – P. 9264–9275. DOI: 10.1109/ICCV51070.2023.00853

7. Wang Z. ProlificDreamer: High-Fidelity and Diverse Text-to-3D Generation with Variational Score Distillation / Z. Wang, C. Lu, Yikai Wang, F. Bao, C. Li, H. Su, J. Zhu // Advances in Neural Information Processing Systems 36: proceedings of the 37th Annual Conference on Neural Information Processing Systems, 2023. – P. 8406–8441. DOI: 10.52202/075280-0368

8. Wu T. Recent Advances in 3D Gaussian Splatting / T. Wu, Y.-J. Yuan, L.-X. Zhang, J. Yang, Y.-P. Cao, L.-Q. Yan, L. Gao // Computational Visual Media. – 2024. – Vol. 10, No. 4. – P. 613–642. DOI: 10.1007/s41095-024-0436-y

9. Zhou J. DiffGS: Functional Gaussian Splatting Diffusion / J. Zhou, W. Zhang, Y.-S. Liu // Advances in Neural Information Processing Systems 37 (NeurIPS 2024): proceedings of the 38th Annual Conference on Neural Information Processing Systems, 2024. – P. 37535-37560. DOI: 10.52202/079017-1185

10. DiffSplat: Repurposing Image Diffusion Models for Scalable Gaussian Splat Generation [Electronic resource] // arXiv.org. – URL: https://arxiv.org/abs/2501.16764 (дата обращения: 10.07.26).

11. Liu S. A Survey of 3D Reconstruction: The Evolution from Multi-View Geometry to NeRF and 3DGS / S. Liu, M. Yang, T. Xing, R. Yang // Sensors. – 2025. – Vol. 25, no. 18. – 5748 p. DOI: 10.3390/s25185748

12. Wang C. Diffusion Models for 3D Generation: A Survey / C. Wang, M. Tang, B. Liu, H. Wang, P. Tan // Computational Visual Media. – 2025. – Vol. 11, No. 1. – P. 1–28. DOI: 10.26599/CVM.2025.9450452

УДК 004.72

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

ОПТИМИЗАЦИЯ РУКОПОЖАТИЯ TLS ЧЕРЕЗ СЖАТИЕ СЕРТИФИКАТОВ RFC 8879 НА ОСНОВЕ IDECO NGFW

Аннотация. В статье рассматривается проблема задержек при установлении соединений Transport Layer Security (TLS) 1.3 в корпоративных сетях, вызванная фрагментацией объемных цепочек сертификатов на транспортном уровне. Целью исследования является количественная оценка эффективности стандарта сжатия сертификатов RFC 8879 (алгоритм zlib) при проксировании зашифрованного трафика через межсетевой экран Ideco NGFW. На базе экспериментального стенда проанализировано влияние компрессии на время рукопожатия и вычислительную нагрузку шлюза при варьировании размеров цепочек и сетевой задержки. Установлено, что для крупных сертификатов (более 11 Кбайт) сжатие сокращает медианное время соединения на 29% за счет устранения дополнительного цикла RTT. Для малых цепочек сетевой эффект отсутствует. Предложены практические пороговые критерии включения компрессии.

Ключевые слова: TLS 1.3, RFC 8879, сжатие сертификатов, межсетевой экран, Ideco NGFW, время установления соединения, zlib.

Введение. Переход на протокол TLS 1.3, описанный в RFC 8446, сократил число обменов при установлении соединения, однако передача объемных цепочек сертификатов X.509 остается фактором сетевой задержки [1, 2]. При превышении лимита стартового окна перегрузки TCP (initcwnd), регулируемого стандартом RFC 6928, передача фрагментируется на дополнительные транспортные циклы (flights), что линейно увеличивает время инициализации сессии пропорционально круговой задержке (RTT) [3]. Для оптимизации транспортной нагрузки стандарт RFC 8879 регламентирует сжатие сообщения Certificate с применением алгоритмов компрессии, таких как zlib [4, 5].

В корпоративных инфраструктурах зашифрованный трафик проходит через межсетевые экраны нового поколения (NGFW) с функцией авторизованного MITM-проксирования [6, 7]. На внешнем сегменте «шлюз – целевой сервер» передаются полные цепочки сертификатов, где применение сжатия имеет наибольший потенциал.

Целью настоящей работы является количественная оценка влияния механизма сжатия сертификатов RFC 8879 на время установления соединения TLS 1.3 и загрузку процессора при проксировании трафика через Ideco NGFW. Результаты исследования направлены на формирование пороговых критериев

для селективного применения компрессии на пограничных шлюзах безопасности.

Результаты исследования. Для количественной оценки эффективности механизма RFC 8879 при MITM-проксировании на базе Ideco NGFW (версия 21) был спроектирован экспериментальный стенд (рисунок 1), включающий три клиентские станции под управлением ОС «Альт» (2 vCPU, 2 ГБ ОЗУ), пограничный шлюз Ideco NGFW (4 vCPU, 16 ГБ ОЗУ) и внешний TLS-сервер на базе OpenSSL 3.3.3 (2 vCPU, 2 ГБ ОЗУ). В качестве транспортного протокола использовался HTTP/1.1 поверх TCP. Сжатие по алгоритму zlib применялось исключительно на внешнем сегменте «шлюз – целевой сервер» к полной цепочке сертификатов, тогда как на внутреннем сегменте «клиент – шлюз» передавался компактный подменный сертификат шлюза (~356 байт), не требующий компрессии.

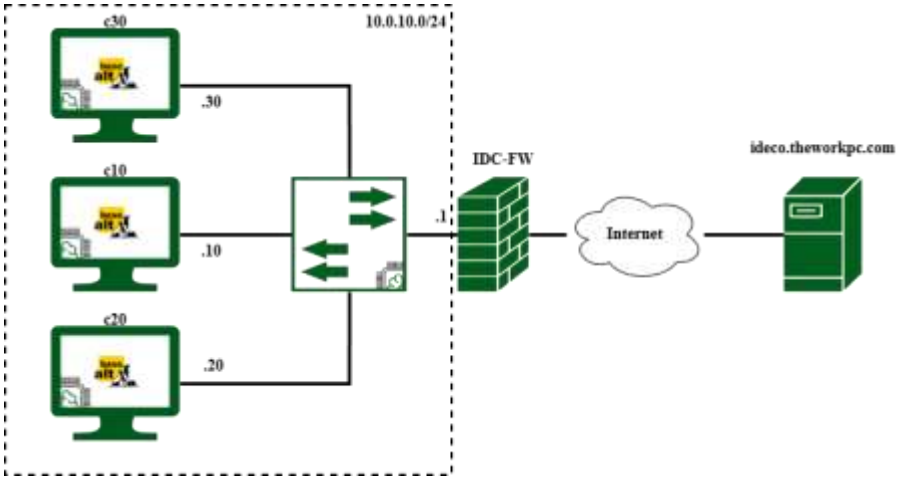


Рисунок 1. Топология стенда

Коэффициент уменьшения объема цепочки сертификатов после сжатия вычисляется по формуле (1):

$$R_{\text{comp}} = 1 - \frac{C}{U} \tag{1}$$

Время установления защищенного соединения аппроксимируется аналитической моделью по формуле (2):

$$T_{\text{handshake}} = RTT \cdot \left\lceil \frac{Size_{\text{cert}} \cdot \left(1 - R_{\text{comp}}\right)}{MSS} \right\rceil + T_{\text{cpu}} + T_{\text{base}_{\text{tls}}} \tag{2}$$

Основной метрикой исследования является время handshake ($T_{handshake}$), измеряемое утилитой tcpdump на клиентском интерфейсе от отправки TCP SYN до получения первого пакета Application Data. Вспомогательной метрикой служит средняя загрузка процессора шлюза по данным mpstat, а приращение нагрузки определяется как ΔCPU. В эксперименте варьировались три уровня размера цепочки сертификатов (small

– 4147 байт, medium – 6780 байт, large – 11855 байт) и два уровня сетевой задержки внешнего канала (RTT 0 мс и RTT 50 мс, задаваемая через tc netem). Всего выполнено 3600 замеров. Для сопоставления выборок использовался двухвыборочный t-критерий Уэлча ($\alpha = 0{,}05$).
Внедрение алгоритма zlib обеспечило коэффициент сжатия (R_{comp}) от 0,370 до 0,540, при этом максимальная эффективность сокращения объема достигнута на крупной цепочке (54%). Результаты замера приведены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты сжатия цепочек сертификатов (RFC 8879, zlib)

Цепочка	Исходный размер, байт	Сжатый размер, байт	Сокращение, %	Отношение U/C	R_{comp}
Малый объём (small)	4147	2559	38,3	1,62	0,383
Средний объём (medium)	6780	4272	37,0	1,59	0,370
Крупный объём (large)	11855	5453	54,0	2,17	0,540

Сводная описательная статистика по $T_{\text{handshake}}$ представлена в таблице 2.

Таблица 2. Описательная статистика времени handshake (мс)

Цепочка	RTT, мс	Сжатие	Среднее	Медиана	σ	95 % ДИ среднего
Крупный (large)	0	Без сжатия	111,5	109,1	39,0	[107,1; 115,9]
Крупный (large)	0	Сжатие zlib	82,3	80,1	21,2	[79,9; 84,8]
Крупный (large)	50	Без сжатия	260,5	258,0	47,0	[255,2; 265,9]
Крупный (large)	50	Сжатие zlib	185,2	183,4	37,6	[181,0; 189,5]
Средний (medium)	0	Без сжатия	80,1	78,2	20,2	[78,1; 82,2]
Средний (medium)	0	Сжатие zlib	81,5	78,3	22,4	[79,6; 83,5]
Средний (medium)	50	Без сжатия	180,5	178,3	34,6	[176,5; 184,6]
Средний (medium)	50	Сжатие zlib	186,2	183,7	36,7	[182,1; 190,3]
Малый (small)	0	Без сжатия	80,5	78,9	18,7	[78,5; 82,5]
Малый (small)	0	Сжатие zlib	75,2	73,7	20,0	[73,3; 77,2]
Малый (small)	50	Без сжатия	179,2	177,5	33,3	[175,3; 183,1]
Малый (small)	50	Сжатие zlib	180,9	178,5	35,4	[176,9; 184,9]

При задержке внешнего канала RTT = 50 мс для крупной цепочки (large) медианное время установления соединения снизилось с 258,0 до 183,4 мс, что означает ускорение на 29% ($-74{,}6$ мс). Этот эффект обусловлен сокращением размера TLS-ответа с 11 до 5 сегментов TCP (при MSS = 1460 байт), благодаря чему весь объем данных укладывается в стартовое окно перегрузки (initcwnd = 10) и устраняется необходимость ожидания промежуточного ACK для отправки второго flight. При RTT = 0 мс для крупной цепочки выигрыш по медиане составил 26% ($109{,}1 \rightarrow 80{,}1$ мс). Статистическая значимость изменений для категории large подтверждена критерием Уэлча (таблица 3).

Таблица 3. Сравнение режимов без сжатия и со сжатием zlib

Цепочка	RTT, мс	Медиана без сжатия, мс	Медиана со сжатием, мс	Δ медиана, мс	Δ, %	t	p
Крупный (large)	0	109,1	80,1	−29,0	−26,6	11,38	$1{,}25\times10^{-26}$
Крупный (large)	50	258,0	183,4	−74,6	−28,9	21,77	$8{,}42\times10^{-77}$
Средний (medium)	0	78,2	78,3	+0,1	+0,1	−0,81	0,418
Средний (medium)	50	178,3	183,7	+5,4	+3,0	−1,85	0,064
Малый (small)	0	78,9	73,7	−5,2	−6,6	2,44	0,015
Малый (small)	50	177,5	178,5	+1,0	+0,6	−2,11	0,035

Для средних (medium) и малых (small) цепочек сертификатов применение компрессии zlib не привело к улучшению временных метрик (таблица 4). При RTT = 50 мс наблюдалась микродеградация медианного времени: +5,4 мс для средних цепочек (различие статистически незначимо, $p = 0{,}064$) и +1,0 мс для малых цепочек (статистически значащая микродеградация, $p = 0{,}035$, без практического эффекта). Негативный эффект объясняется тем, что полные TLS-ответы для малых и средних цепочек изначально укладываются в лимит initcwnd (3 и 5 сегментов соответственно), поэтому сжатие не сокращает количество транспортных циклов передачи данных.

Таблица 4. Приращение времени при переходе RTT с 0 до 50 мс

Цепочка	Сжатие	ΔT (медиана), мс	Кратность RTT
Крупный (large)	Без сжатия	148,9	≈ 3 × 50
Крупный (large)	Сжатие zlib	103,3	≈ 2 × 50
Средний (medium)	Без сжатия	100,1	≈ 2 × 50
Средний (medium)	Сжатие zlib	105,4	≈ 2 × 50
Малый (small)	Без сжатия	98,6	≈ 2 × 50
Малый (small)	Сжатие zlib	104,8	≈ 2 × 50

Оценка вычислительных затрат процессора Ideco NGFW показала, что приращение нагрузки (ΔCPU) монотонно возрастает с увеличением исходного объема данных (таблица 5). Для малой цепочки влияние на процессор пренебрежимо мало (+0,01 п.п.), для средней составляет +0,30 п.п., а для крупной цепочки достигает максимального значения +0,83 п.п.. В случае с крупной цепочкой рост загрузки процессора на 0,83 п.п. полностью компенсируется чистым сетевым выигрышем в 74,6 мс.

Таблица 5. Приращение загрузки CPU NGFW при нагрузке

Цепочка	CPU без сжатия, %	CPU со сжатием, %	ΔCPU, п.п.
Малый (small)	7,75	7,76	+0,01
Средний (medium)	7,88	8,18	+0,30
Крупный (large)	5,70	6,53	+0,83

Заключение. Экспериментальная оценка механизма сжатия сертификатов RFC 8879 (алгоритм zlib) при проксировании TLS 1.3-трафика через Ideco NGFW подтвердила его эффективность для снижения задержек на каналах с повышенным RTT. Оптимизация достигается за счет упаковки серверного ответа в границы стартового окна перегрузки TCP (initcwnd), что устраняет дополнительные циклы круговой передачи. На практике администрирования пограничных шлюзов безопасности данная зависимость требует селективного подхода к конфигурации. Алгоритм zlib целесообразно активировать на внешнем контуре для ресурсов со сложной инфраструктурой открытых ключей (PKI) при условии, что размер несжатого сертификата превышает 8 TCP-сегментов MSS (более ~11 Кбайт). Для сертификатов объемом менее 7 Кбайт (7 и менее сегментов) функцию необходимо отключать: в таких случаях процессорные затраты на компрессию не компенсируются сетевым выигрышем и провоцируют микродеградацию времени соединения.

Список литературы:

1. Rescorla E. RFC 8446: The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3 / E. Rescorla // RFC Editor, 2018. – 160 p. DOI: 10.17487/RFC8446
2. Cooper D. RFC 5280: Internet X.509 Public Key Infrastructure Certificate and Certificate Revocation List (CRL) Profile / D. Cooper, S. Santesson, S. Farrell [et.al.] // RFC Editor, 2008. – 147 p. DOI: 10.17487/rfc5280
3. Chu J. RFC 6928: Increasing TCP's Initial Window / J. Chu, N. Dukkipati, Y. Cheng, M. Mathis // RFC Editor, 2013. – 21 p. DOI: 10.17487/rfc6928
4. Ghedini A. RFC 8879: TLS Certificate Compression / A. Ghedini, V. Vasiliev // RFC Editor, 2020. DOI: 10.17487/RFC8879
5. Deutsch P. RFC 1950: ZLIB Compressed Data Format Specification version 3.3 / P. Deutsch, J. Gailly // RFC Editor. – 1996. – 10 p. DOI: 10.17487/rfc1950
6. Уймин А. Г. Сетевое и системное администрирование. Демонстрационный экзамен КОД 1.1: учебно-методическое пособие для СПО / А. Г. Уймин // Лань, 2020. – 480 с.
7. Об Ideco NGFW Novum [Электронный ресурс] // Ideco. – URL: https://docs.ideco.ru/v21.pdf (дата обращения: 25.06.2026).

УДК 004.05

Шошков Н. О., Гечис Владас
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ИНТЕГРАЦИОННЫХ ТЕСТОВЫХ СЦЕНАРИЕВ НА ОСНОВЕ BPMN-МОДЕЛЕЙ

Аннотация. В статье рассматривается проблема проектирования интеграционных тестовых сценариев на основе функциональных требований при разработке распределённых информационных систем. Показано, что использование текстовых технических заданий не обеспечивает систематического формирования тестовых сценариев и часто приводит к неполному покрытию альтернативных и ошибочных вариантов поведения системы. Предлагается методика преобразования BPMN-моделей бизнес-процессов в структурированный набор интеграционных тестовыых сценариев. Методика основана на анализе потоков сообщений, шлюзов и событий BPMN 2.0 и позволяет систематически выявлять основные, альтернативные и исключительные пути выполнения процесса. Разработан набор правил преобразования элементов BPMN-модели в тестовые сценарии. Предлагаемый подход ориентирован на применение на этапе тест-дизайна и не требует использования специализированных средств автоматической генерации тестов.
Ключевые слова: BPMN, интеграционное тестирование, тест-дизайн, анализ требований к информационной системе, бизнес-процесс, моделирование процессов, MBT.

Введение. Рост сложности современных информационных систем приводит к увеличению количества межсистемных взаимодействий, реализуемых посредством API, брокеров сообщений и сервисных интеграций. В результате возрастает значимость интеграционного тестирования как механизма проверки корректности взаимодействия между компонентами системы.

Практика разработки программного обеспечения показывает, что значительная часть дефектов распределённых систем возникает не внутри отдельных модулей, а на границах их взаимодействия.

При этом проектирование интеграционных тестов в большинстве организаций осуществляется на основе текстовых технических заданий [1, 2]. Такой подход характеризуется высокой трудоёмкостью и отсутствием формализованного механизма преобразования требований в тестовые сценарии [3, 4].

Согласно стандарту ISO/IEC 25010 совместимость и взаимодействие компонентов являются важными характеристиками качества программного обеспечения [5].

Одним из возможных решений является использование BPMN-моделей бизнес-процессов, позволяющих графически представить функциональные требования, описывающие последовательность выполнения операций и взаимодействие интегрируемых информационных систем [6, 7]. Наиболее распространённым стандартом моделирования бизнес-процессов является BPMN 2.0 [8].

Цель исследования заключается в разработке методики формирования интеграционных тестовых сценариев на основе анализа BPMN-моделей бизнес-процессов, описывающих взаимодействие интегрируемых информационных систем.

В отличие от существующих подходов, ориентированных преимущественно на автоматическую генерацию тестов либо формальную верификацию моделей, предлагаемый подход направлен на систематизацию анализа BPMN-моделей и формирование интеграционных тестовых сценариев без использования специализированных средств автоматизации.

Анализ существующих подходов. Современные исследования в области Model-Based Testing (MBT) предлагают различные способы использования моделей для автоматизации тестирования [9].

Первое направление связано с автоматической генерацией тестов на основе BPMN-моделей. Несмотря на высокий уровень автоматизации, подобные решения требуют специального программного обеспечения, дополнительной разметки моделей и сложной настройки [9, 10].

Второе направление предполагает использование BPMN в качестве средства оркестрации уже существующих тестовых сценариев. В данном случае модель определяет последовательность выполнения тестов, однако не участвует в их формировании.

Третье направление связано с формальной верификацией BPMN-моделей и позволяет обнаруживать логические ошибки процессов до начала реализации.

Несмотря на существование указанных подходов, остаётся актуальной задача практического преобразования BPMN-модели в набор интеграционных тестов без применения специализированных инструментов автоматизации.

Сравнительный анализ рассмотренных подходов и предлагаемой методики представлен в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение подходов с предлагаемой методикой.

Подход	Формирует новые тестовые сценарии	Использует BPMN	Требует специализированного ПО	Ориентирован на интеграционное тестирование
Автоматическая генерация	+	+	+	–
Оркестрация тестов	–	+	+	+
Формальная верификация	–	+	+	–
Предлагаемая методика	+	+	–	+

Предлагаемая методика. Предлагаемая методика состоит из трёх этапов:

- построение BPMN-модели связанных компонентов;
- анализ модели;
- формирование набора интеграционных тестов.

На первом этапе на основе функциональных требований строится BPMN-модель бизнес-процесса, описывающего взаимодействие интегрируемых информационных систем. Методика применяется к процессам, последовательность выполнения которых и обмен сообщениями между участниками могут быть представлены средствами нотации BPMN 2.0. В модели должны быть представлены все участники взаимодействия с помощью пулов, потоки сообщений, точки ветвления и исключительные ситуации.

На втором этапе осуществляется систематический анализ модели.

Для систематизации анализа предлагается использовать набор правил преобразования элементов BPMN в тестовые сценарии.

Для обеспечения единообразного подхода к анализу BPMN-моделей предлагается использовать набор правил преобразования элементов нотации в интеграционные тестовые сценарии. Следует отметить, что методика ориентирована на анализ элементов BPMN, непосредственно описывающих межсистемное взаимодействие и оказывающих влияние на формирование интеграционных тестовых сценариев. Основные правила представлены в таблице 2.

Таблица 2. Правила формирования интеграционных тестов

Элемент BPMN	Правило формирования тестов
Message Flow	Для каждого потока формируются сценарии успешной обработки сообщения, обработки ошибки и нарушения обмена
Exclusive Gateway	Количество тестовых сценариев должно быть не меньше количества исходящих ветвей
Event-Based Gateway	Для каждого возможного события формируется отдельный сценарий
Timer Event	Формируется сценарий обработки таймаута
Error Event	Формируется сценарий обработки исключительной ситуации
Receive Task	Проверяется корректность получения сообщения
Send Task	Проверяется корректность отправки сообщения
Service Task	Проверяется корректность выполнения автоматизированной операции

На третьем этапе результаты анализа преобразуются в чек-лист или матрицу тестового покрытия.

Алгоритм анализа BPMN-модели. Предлагаемый алгоритм может быть представлен следующей последовательностью действий:

Шаг 1. Определение всех участников процесса.

Шаг 2. Выделение всех межсистемных взаимодействий.

Шаг 3. Формирование сценариев успешного прохождения каждого взаимодействия.

Шаг 4. Анализ всех шлюзов и добавление альтернативных сценариев.

Шаг 5. Анализ событий ошибок и таймеров.

Шаг 6. Формирование итоговой матрицы тестового покрытия.

Шаг 7. Проверка полноты покрытия BPMN-модели.

Пример применения методики. Рассмотрим процесс взаимодействия между клиентским приложением и внешним сервисом.

После отправки запроса приложение ожидает ответ от внешней системы. В модели присутствует event-based gateway, определяющий два возможных варианта развития событий:

- получение ответа;
- истечение времени ожидания.

Для каждого варианта выполнения процесса дополнительно рассматриваются возможные исключительные ситуации, возникающие при взаимодействии информационных систем.

В соответствии с предлагаемой методикой должны быть сформированы следующие тестовые сценарии:

ТС-1. Успешное получение ответа.

ТС-2. Получение ответа с ошибкой.

ТС-3. Таймаут при ожидании ответа.

ТС-4. Повторная отправка запроса после таймаута.

Пример демонстрирует, что использование BPMN позволяет систематически выявлять сценарии, которые часто остаются неявными в текстовом техническом задании.

Преимущества методики. Предлагаемая методика обладает следующими преимуществами:

- снижает зависимость качества тестового покрытия от опыта тестировщика;
- способствует выявлению альтернативных и исключительных сценариев;
- использует общепринятый международный стандарт BPMN 2.0;
- не требует специализированных средств автоматизации;
- может применяться на ранних этапах жизненного цикла программного обеспечения.

Ограничения методики. Предлагаемая методика имеет следующие ограничения:

- **отсутствие автоматизации**. Построение BPMN-модели и её последующий анализ выполняются вручную;
- **зависимость от качества исходных требований**. Полнота формируемых тестовых сценариев определяется полнотой функциональных требований, по которым построена BPMN-модель;
- **не охватывает нефункциональные требования**;
- **не заменяет проектирование на уровне тестовых данных**. Методика ориентирована на формирование структурного набора интеграционных тестовых сценариев и не определяет способы выбора конкретных тестовых данных.

Несмотря на указанные ограничения, методика позволяет систематизировать процесс формирования интеграционных тестовых сценариев и повысить полноту покрытия интеграционных взаимодействий на этапе анализа требований.

Выводы. В ходе исследования разработана методика формирования интеграционных тестовых сценариев на основе BPMN-моделей.

Предложенный подход основан на последовательном анализе потоков сообщений, шлюзов и событий BPMN-модели. Разработаны правила по анализу элементов BPMN, описывающих межсистемное взаимодействие, и формированию на их основе интеграционных тестовых сценариев.

Практическая ценность методики заключается в возможности систематического выявления тестовых сценариев на этапе анализа требований без необходимости использования специализированных инструментов автоматической генерации тестов.

Список литературы:

1. ГОСТ 34.602–2020. Техническое задание на создание автоматизированной системы. – М.: Стандартинформ, 2020. – 13 с.
2. ГОСТ 19.201–78. Единая система программной документации. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению. – М.: Издательство стандартов, 1978.
3. Pressman R.S., Maxim B.R. Software Engineering: A Practitioners Approach. – McGraw-Hill Education, 2019. – 1408 с.
4. Майерс Г., Сэндлер К., Бэджетт Т. Искусство тестирования программ. – 3-е изд. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2012. – 272 с.
5. ГОСТ Р исо/мэк 25010–2015. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов // М.: Стандартинформ, 2015. – 29 с.
6. Сатюков А.Д. Использование BPMN для описания бизнес-процессов в финансовых ИТ-системах // Modern Economy Success. – 2025. – № 3. – С. 238–244. EDN: JKCXJH
7. Потрусаев С.А. Комплексное моделирование сложных процессов на основе нотации BPMN // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 11. – С. 913–920. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-11-913-920 EDN: XAZLIH
8. ISO/IEC 19510:2013. Information Technology – Object Management Group Business Process Model and Notation // ISO. – 2013.
9. Бритвина Е.Н., Грошев С.Г., Монахов А., Петренко А.К., Петренко О.Л. Тестирование на основе моделей // М.: Открытые системы. – 2003. – № 9. – С. 41-47.
10. Binder R. Testing Object-oriented Systems: Models, Patterns, and Tools. – Addison-Wesley Professional, 2000. – 1191 p.

УДК 656.1

Смоляков С. А.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОВЫХ АВТОБУСОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ

Аннотация. Целью работы является анализ применимости технологий искусственного интеллекта для перехода к предиктивной модели обслуживания. В ходе исследования выполнена оценка нескольких перспективных телеметрических платформ для сбора данных с автомобилей, проведён анализ нейросетевых архитектур, с особым акцентом на рекуррентные сети (LSTM, GRU) и автоэнкодеры для поиска и выявления отклонений во временных рядах телеметрических данных, а также разобраны примеры использования ИИ крупными компаниями для предиктивного обслуживания транспорта.

Ключевые слова: телеметрические данные, предиктивное обслуживание, газомоторный транспорт, нейронные сети, LSTM, автоэнкодеры, прогрессирующие отказы, анализ временных рядов.

Введение. Развитие городского транспорта сегодня во многом зависит от способности транспортных предприятий обеспечивать устойчивую, безопасную и бесперебойную работу подвижного состава. Газовые автобусы занимают значительную долю в муниципальных автопарках, благодаря своим экологическим преимуществам, однако эксплуатация такого транспорта сопровождается рядом технических вызовов. Многие узлы газовых двигателей подвержены постепенной деградации и старению, что приводит к скрытым дефектам, не выявляемым традиционными методами диагностики. Это делает обслуживание газомоторной техники чувствительным к неопределённости, а эффективность работы автопарка – зависимой от своевременного обнаружения изменений в состоянии оборудования.

Проблематика исследования обусловлена тем, что классические методы технического обслуживания – регламентные или основанные на ремонте по факту поломки – не позволяют своевременно реагировать на развитие скрытых отказов. Возникает необходимость в применении подходов, которые учитывают динамику параметров техники, позволяют распознавать ранние признаки неисправностей и предсказывать момент наступления критического состояния. Такие подходы требуют обработки больших объёмов данных и применения интеллектуальных моделей, способных анализировать изменение состояния узлов во времени.

Научная значимость работы заключается в развитии концепции анализа прогрессирующих отказов с использованием современных вычислительных

методов, анализе отечественных и международных телеметрических платформ, а также в рассмотрении способов применения интеллектуальных моделей для отслеживания поведения технических систем в динамике. Практическая значимость состоит в возможности использовать результаты исследования для повышения надёжности газомоторного транспорта, сокращения непредвиденных простоев и оптимизации процессов обслуживания. Тем самым работа способствует повышению эффективности эксплуатации городских автопарков и снижению затрат на содержание техники.

Методологические основы и базовая архитектура для сбора данных с датчиков автомобиля. По сути, для построения методологии прогнозирования отказов газовых автобусов в рамках данного исследования требуются всего три составляющих: базовая архитектура для сбора телеметрических данных с датчиков автомобиля, обученная модель для анализа собранных данных и прогнозирования состояния узлов, а также интерфейс возврата-вывода результатов для считывания оператором [5].

Так, архитектура сбора и передачи данных является основополагающим элементом любой телеметрической системы, определяя ее надежность, актуальность и объём собираемой информации. Для задачи прогнозирования состояния автобусов такая архитектура должна обеспечивать не только базовый мониторинг, но и высокую частоту обновления, точность передачи и гибкость в выборе каналов коммуникации. Система должна состоять из нескольких ключевых компонентов: бортовых датчиков, телеметрического терминала, сети связи и серверной части платформы. Датчики могут быть как непосредственно встроены в автомобиль (например, датчики CAN-шины), так и подключаться дискретно (датчики уровня газа, температуры, давления). Терминал выполняет функцию сбора, предварительной обработки и передачи этой информации.

В настоящее время уже существует ряд перспективных решений по сбору крупных массивов данных с легковых и грузовых автомобилей, а также автобусов и спецтехники, к которым можно обратиться при обучении модели прогнозирования отказов [5].

К таким продуктам относится платформа «Автодата» – федеральный хаб данных и аналитических сервисов автомобильного транспорта. «Автодата» является федеральной государственной платформой, созданной для консолидации, обработки и предоставления данных из всей автотранспортной и дорожно-транспортной сфер России. Разработка платформы велась компанией «Рексофт» для Федерального сетевого оператора НП «ГЛОНАСС». Целью было создание единого доверенного пространства для всех участников рынка, решающего проблемы фрагментации данных и обеспечения их качества и безопасности. Масштаб данных, с которыми оперирует платформа,

колоссален. Сами автомобили генерируют около 4 терабайт данных в день, охватывая более 6 тысяч типов параметров. По прогнозам, к шестому году эксплуатации годовой объем входящих данных превысит 15 петабайт, а требуемый объем хранилища с учетом резервирования составит более 170 петабайт. Такой масштаб открывает беспрецедентные возможности для применения методов искусственного интеллекта и машинного обучения в предиктивной и рекомендательной аналитике.

Ключевым фактором, делающим «Автодата» идеальной средой для предиктивной аналитики, является стандартизация данных. В рамках платформы был разработан и утвержден ГОСТ Р 59237-2020, который определяет состав данных, собираемых с транспортных средств. Платформа собирает данные из десятков различных источников: непосредственно от автопроизводителей, систем «Платон» и «ЭРА-ГЛОНАСС», дилерских сервисных центров, страховых компаний и государственных информационных систем. Это позволяет формировать богатый набор данных, объединяющий техническое состояние автомобиля, условия его эксплуатации, поведение водителя и характеристики дорожной инфраструктуры.

Самыми крупными на российском рынке телематических платформ, однако же считаются Wialon и Runovo. Каждый со своими уникальными преимуществами и недостатками.

Wialon, разработанная компанией Gurtam, является глобальным решением, которое активно используется во многих странах мира, включая Россию. Её архитектура отличается высокой степенью гибкости и поддерживает огромное количество различных типов телематических терминалов от разных производителей. Это даёт заказчику свободу выбора оборудования, оптимального под конкретные нужды. Что касается архитектуры сбора данных, Wialon поддерживает современные и эффективные протоколы передачи информации, что делает её привлекательной для задач, требующих минимальной задержки и высокой частоты обновления данных.

С точки зрения спектра собираемых параметров, Wialon предлагает широкие возможности. Платформа поддерживает глубокое чтение данных из CAN-шины автомобилей, что позволяет получать доступ к сотням производственных параметров, включая те, которые критически важны для анализа газового ДВС: температуры охлаждающей жидкости и масла, обороты двигателя, топливная подача, а также считывание кодов неисправностей. Кроме того, Wialon позволяет легко интегрировать различные внешние датчики, включая датчики расхода газа, что решает проблему точного учёта топлива. Интеграционные возможности Wialon являются одним из ее сильных сторон. Платформа предоставляет мощный и хорошо документированный Rest Api, который позволяет с высокой гибкостью извлекать и выводить

данные в форматах JSON и XML. Это идеально соответствует требованиям научного исследования, так как обеспечивает надёжный и стандартизированный способ получения сырых данных для обучения моделей.

Runovo – это один из крупнейших российских операторов телематических услуг, предлагающий комплексное решение "под ключ". Как и Wialon, Runovo поддерживает широкий спектр телематических терминалов и предоставляет доступ к базовым параметрам, таким как местоположение, скорость и статус двигателя. Важным преимуществом Runovo является его глубокая интеграция с российской экосистемой. Платформа может предлагать оптимизированные решения для работы в России, например, использование локальных серверов для обработки данных, что может снизить затраты на передачу данных по сотовым сетям. Однако, когда дело доходит до интеграционных возможностей, ситуация может быть иной. Часто у крупных российских провайдеров API может быть более "закрытым" или иметь ограничения, ориентированные на интеграцию с другими продуктами внутри той же экосистемы, а не с внешними научными проектами. Для точной оценки пригодности Runovo для данного исследования необходимо получить официальную документацию по его API и провести тестовое подключение для проверки скорости, надежности и удобства извлечения данных.

Стоит оговориться, что платформы «Автодата», «Wialon» и «Runovo» невозможно использовать для единичного эксперимента с точки зрения обучения нейронной сети. Такие платформы есть смысл использовать в промышленных масштабах для отслеживания больших массивов данных с десятками и сотнями единицами техники.

Единичный же эксперимент возможно провести, используя возможности компьютерного моделирования и построения условий, приближённых к реальным, либо на единичном образце техники, отслеживая изменения выбранных параметров при эксплуатации в реальном времени, пропуская их через модель машинного обучения.

Рекуррентные сети для анализа прогрессирующих отказов. Собрав необходимые телеметрические данные, необходимо на этих данных обучить нейросеть для последующего уже самостоятельного прогнозирования отказов моделью.

Для обслуживания газовой техники одним из наиболее фундаментальных и мощных классов нейросетевых моделей являются рекуррентные нейронные сети, в частности их современные варианты – LSTM и GRU [8]. Их ключевое преимущество заключается в способности обрабатывать последовательные данные, такие как временные ряды, что идеально соответствует природе данных, получаемых с автомобильных датчиков. Температура, давление, обороты коленчатого вала, вибрация – все

эти параметры изменяются во времени, и многие отказы развиваются постепенно, создавая характерные "треки" на графиках. RNN и их производные способны "запоминать" информацию из прошлых моментов времени и использовать ее для анализа текущего состояния, что делает их незаменимыми для прогнозирования медленно развивающихся неисправностей [9]. LSTM, в частности, является наиболее широко применяемой архитектурой для задач прогнозирования остаточного срока службы и предсказания отказов благодаря своей сложной структуре из трех "ворот" (forget, input, output), которая позволяет ей контролировать поток информации и эффективно удерживать долгосрочные зависимости данных. GRU представляет собой упрощенную версию LSTM с двумя воротами, которая часто показывает схожую производительность, но с меньшим числом параметров и более быстрым обучением.

Эти модели находят прямое применение в диагностике таких критически важных для газомоторной техники компонентов, как турбокомпрессор и охлаждающая система. Например, для прогнозирования остаточного ресурса турбокомпрессора модель может анализировать многомерный временной ряд, содержащий данные о температуре турбины, давлении наддува, расходе масла и вибрации. Анализируя эти данные на протяжении времени, LSTM способен выявить малейшие отклонения от нормального режима работы, которые могут указывать, например, на начальный износ подшипников. Аналогичным образом, для охлаждающей системы, одной из самых уязвимых частей КПГ-двигателей, LSTM может обучиться нормальному паттерну изменения температуры охлаждающей жидкости в зависимости от нагрузки, скорости движения и температуры окружающей среды. Любое значительное отклонение от этого паттерна, например, резкий скачок температуры при стабильной нагрузке, будет распознано как аномалия, указывающая на возможный отказ радиатора, помпы или проблемы с термостатом. Эта способность к обнаружению аномалий во временных рядах является еще одной ключевой функцией RNN [9].

Несмотря на свою эффективность, применение RNN и автоэнкодеров сопряжено с рядом вызовов. Одним из главных ограничений является потребность в больших объемах последовательных данных для обучения, в идеале – от начала эксплуатации до отказа, что сложно получить на практике. Кроме того, процесс обучения рекуррентных сетей может быть очень ресурсоемким и длительным по сравнению с другими архитектурами. Тем не менее, их способность анализировать временные зависимости делает их незаменимым инструментом в арсенале предиктивного обслуживания, позволяя системам перейти от реактивной и планово-предупредительной модели к истинно предиктивной, где можно не просто узнать о поломке, но и

спрогнозировать время ее наступления с достаточной точностью для планирования ремонта [1,2,3].

Коммерческие платформы и международный опыт внедрения технологий предиктивного обслуживания. Наиболее наглядным доказательством жизнеспособности и коммерческой ценности идей предиктивного обслуживания на базе нейросетей служат практические примеры внедрения комплексных платформ в транспортной отрасли.

Одним из ключевых игроков в этом сегменте является компания Uptake Technologies Inc., которая предлагает ИИ-ориентированную платформу «Uptake Fleet». Платформа предназначена для определения технического состояния автопарка, снижения затрат на его обслуживание; минимизации времени простоя транспорта, а также для улучшения его топливной экономичности. Успешным примером внедрения технологии можно считать историю компании United Road Service, крупного оператора тяжелых грузовых перевозок в Северной Америке.

Техническая реализация решения создана в партнёрстве между Uptake Technologies Inc. и Geotab – мировым лидером в области решений для управления подключенными транспортными средствами и активами. Техническое решение представляет собой систему, которая эффективно сочетает аппаратные компоненты, облачные вычисления и передовые аналитические методы. Грузовые автомобили оснащаются устройствами Geotab, которые подключаются к бортовой диагностической системе и собирают данные с сотни различных датчиков, что значительно больше, чем информация, доступная через стандартный порт OBD-II. Эти устройства не просто собирают сырые данные, а используют запатентованный алгоритм для оптимизации и быстрой передачи информации в облако, минимизируя потребление трафика. Собранные данные включают широкий спектр параметров двигателя, трансмиссии, тормозной системы и других узлов, которые служат основой для анализа. После того как данные достигают облачной инфраструктуры Uptake, начинается этап их глубокой обработки и анализа с помощью собственных ИИ-моделей компании. Ключевым преимуществом этого подхода является возможность контекстуализации данных. Система не рассматривает каждый параметр в отрыве от других – она учитывает множество внешних и внутренних факторов, чтобы повысить точность прогнозов. К таким факторам относятся, например, текущие погодные условия, которые влияют на работу двигателя и расход топлива, а также исторические данные о работе аналогичных компонентов в парках других клиентов. Такой комплексный анализ позволяет системе выявлять не только очевидные аномалии, но и более тонкие паттерны, предшествующие отказу. Например, система способна распознавать характерные флуктуации напряжения как ранний признак скорого выхода из строя генератора. Особого

внимания заслуживает принцип вывода информации для пользователя. Система активизирует уведомления только тогда, когда компонент находится под реальной и неминуемой угрозой отказа. Это позволяет службам технического обслуживания сосредоточиться именно на проблемах, требующих немедленного внимания, и планировать ремонтные работы наиболее эффективным образом, минимизируя простои и непредвиденные расходы.

Таким образом, решение Uptake и Geotab представляет собой целостную экосистему, где аппаратная часть обеспечивает надежный сбор данных, облачная платформа выполняет их интеллектуальный анализ, а бизнес-процессы получают готовые, действенные инсайты, приводящие к прямому финансовому и операционному эффекту. Этот пример является образцом того, как теоретические возможности нейронных сетей успешно трансформируются в работающее, масштабируемое и прибыльное коммерческое решение.

Таких примеров достаточно много. Многие лидирующие на международном автомобильном рынке компании уже сейчас интегрируют нейронные сети в обслуживание своего транспорта.

Так, компания Preteckt из США представила свою облачную ИИ-платформу для диагностики автобусов и грузовиков на основе технологий LSTM-автоэнкодеров и методов градиентного бустинга. Их модель способна прогнозировать состояния трансмиссии, тормозной системы и подвески за 7-14 дней до наступления отказа на основе анализа данных OBD-II и телематики автомобиля. В 2024 г. компания была приобретена Diesel Laptops для интеграции в экосистему диагностики коммерческого транспорта, что впоследствии снизило внеплановые простои транспорта на 30-35%.

В том же 2024 году Volvo Trucks представила своё решение по адаптивному ТО – Blue Service AI. Технология – рекуррентные нейронные сети, в частности LSTM. Модели анализируют расход топлива, время простоя, пробег и на их основании корректируют график ТО – при низкой нагрузке интервал между ТО увеличивается, а при высокой сокращается. В результате компания снизила операционные затраты на 12-18%.

В том же году компания Scania поддержала исследователей в области ИИ и опубликовала мультивариантные временные ряды с более чем двух сотен датчиков грузовиков Scania, которые включают в том числе операционные параметры, спецификации ТС, записи о ремонтах и т.д. Эти данные используются для обучения моделей и бенчмаркинга прогнозирования остаточного ресурса.

В России на данный момент своё решение представила только «Газпромнефть – смазочные материалы» - дочернее предприятие «Газпром нефти», специализирующееся на производстве и реализации масел, смазок и технических жидкостей. Суть решения заключается в диагностировании

транспорта при помощи анализа спектра металлов в масле (железо, медь, алюминий) для оценки износа цилиндро-поршневой группы и подшипников. ИИ-алгоритмы сравнивают результаты с базой многолетних исследований и прогнозируют остаточный ресурс двигателя.

Заключение. Проведённый анализ демонстрирует, что применение технологий искусственного интеллекта в предиктивном обслуживании газомоторной техники открывает новые возможности для повышения надежности и оптимизации эксплуатационных процессов. Уже сейчас существуют масштабные решения для сбора и фильтрации данных с транспортных средств, а нейросетевые архитектуры – рекуррентные модели и автоэнкодеры позволяют эффективно анализировать временные ряды телеметрических данных, выявлять скрытые закономерности и формировать точные прогнозы состояния узлов и агрегатов. Благодаря этому транспортные предприятия могут перейти от реактивной и плановой системы обслуживания к полноценной предиктивной модели, обеспечивающей сокращение количества аварийных отказов, снижение стоимости ремонтов и увеличение срока службы оборудования. Однако всё ещё необходимо провести ряд дополнительных исследований и экспериментов, направленных на изучение возможностей искусственного интеллекта в сфере технической эксплуатации транспорта, а также предложить работающий прототип диагностического устройства, способного выявлять аномалии в узлах и прогнозировать их отказы.

Список литературы:

1. AI-Powered Fleet Maintenance Solutions: Revolutionize Operations [Электронный ресурс] // Heavy Vehicle Inspection and Maintenance. – URL: https://heavyvehicleinspection.com/blog/post/ai-powered-fleet-maintenance-solutions-reduce-downtime-costs?trk=article-ssr-frontend-pulse_little-text-block (дата обращения: 26.11.2025).
2. The Future Of Fleets: AI Predictive Maintenance Prevents Breakdowns [Электронный ресурс] // Forbes. – URL: https://www.forbes.com/sites/ganeskesari/2025/07/07/the-future-of-fleets-ai-predictive-maintenance-prevents-breakdowns/ (дата обращения: 26.11.2025).
3. How AI integrates in Fleet Management and improves its efficiency [Электронный ресурс] // It-dimension. – URL: https://it-dimension.com/blog/ai-in-fleet-management/ (дата обращения: 26.11.2025).
4. Moving: How AI-Powered Predictive Maintenance Transforms Public Transport [Электронный ресурс] // Cubic. – URL: https://www.cubic.com/transportation/news/blog/how-ai-powered-predictive-maintenance-transforms-public-transport (дата обращения: 26.11.2025).
5. Ejaz U. AI-driven predictive maintenance in autonomous public transit systems for smart cities / U. Ejaz, M.M. Bakhsh // World Journal of Advanced Research and Reviews. – 2023. – No. 17(01). – P. 1400-1415 DOI: 10.30574/wjarr.2023.17.1.0129
6. How Predictive Analytics and AI Are Redefining Bus Transportation Planning [Электронный ресурс] // Mobisoft. – URL:

https://mobisoftinfotech.com/resources/blog/transportation-logistics/ai-predictive-analytics-bus-transportation-planning (дата обращения: 26.11.2025).

7. How AI Improves in Public Transportation with Predictive Maintenance [Электронный ресурс] // Blockchain Council. – URL: https://www.blockchain-council.org/ai/how-ai-improves-in-public-transportation-with-predictive-maintenance/ (дата обращения: 26.11.2025).

8. Errezgouny A., et.al. An integrated deep learning approach for predictive vehicle maintenance // Decision Analytics Journal. – 2025. – 100597 p. DOI: 10.1016/j.dajour.2025.100597

9. Predictive Maintenance Machine Learning: A Practical Guide [Электронный ресурс] // Neural Concept. – URL: https://www.neuralconcept.com/post/how-ai-is-used-in-predictive-maintenance (дата обращения: 26.11.2025).

10. Указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [Электронный ресурс] // СПС КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_470973/?ysclid=mrfmhcj5mb992778522 (дата обращения: 26.11.2025).

11. Распоряжение Правительства РФ от 12.04.2025 № 908-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года» [Электронный ресурс] // СПС КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_503079/f62ee45faefd8e2a11d6d88941ac66824f848bc2/?ysclid=mrfmg4yswl592614622 (дата обращения: 26.11.2025).

УДК 004.94:005.4

Гильманов А. А., Даянов Д. Р., Исхаков М. У., Кузьмин Н. Д.
Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ BPMN И ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация. В статье рассматривается применение BPMN и цифровых двойников для оптимизации бизнес–процессов предприятий. BPMN используется для формализации логики процесса, а цифровой двойник – для сопоставления модели с фактическими данными, выявления отклонений и проверки сценариев улучшения. Предложен поэтапный подход к внедрению цифрового контура управления процессами.

Ключевые слова: BPMN, цифровой двойник, бизнес–процесс, оптимизация, процессное управление, событийные данные, process mining, цифровая трансформация.

Оптимизация бизнес–процессов предприятий в условиях цифровой трансформации требует не только описания регламентов, но и постоянного сопоставления нормативной модели с фактическим исполнением операций. В традиционной практике описание процесса часто ограничивается текстовым регламентом или статической схемой, поэтому изменения в информационных системах, загрузке исполнителей и маршрутах согласования не всегда своевременно отражаются в управленческой модели. В этих условиях целесообразно рассматривать BPMN как язык формализации процесса, а цифровой двойник как инструмент динамического анализа и проверки решений до их внедрения.

Object Management Group определяет BPMN как стандартную нотацию моделирования бизнес–процессов, ориентированную на участников, которые проектируют, управляют и реализуют процессы; при этом нотация должна быть достаточно точной для последующего перевода моделей в программные компоненты [1]. Для прикладного моделирования это означает, что BPMN может использоваться не только для визуального описания маршрута работ, но и для фиксации событий, задач, шлюзов, ролей, сообщений и исключительных ситуаций. Репин указывает, что моделирование в BPMN применяется компаниями для понимания процессов «как есть», разработки мероприятий по оптимизации и цифровизации, а также формирования регламентирующих документов [2].

Цифровой двойник в широком понимании представляет собой интегрированное виртуальное представление реальных объектов и процессов, синхронизированное с ними с заданной частотой и точностью [3]. В российской нормативной базе ГОСТ Р 57700.37–2021 рассматривает цифровые двойники изделий и устанавливает общие положения их разработки и применения; в

стандарте подчеркнуто, что цифровой двойник объединяет модели в единую систему и используется на стадиях разработки, производства и эксплуатации изделия [4]. Хотя данный стандарт относится прежде всего к изделиям машиностроения, его логика важна и для бизнес–процессов: цифровой двойник должен иметь модельную основу, данные о состоянии объекта управления и механизм проверки изменений.

В отличие от цифрового двойника физического актива, цифровой двойник бизнес–процесса описывает не изделие или оборудование, а последовательность действий, решений, информационных обменов и ресурсов. В работах, посвященных цифровым двойникам бизнес–процессов, подчеркивается, что такая модель должна связывать описание процесса с данными исполнения и поддерживать анализ поведения процесса во времени [5]. Казаков и Азаренко рассматривают пространственно–временной слой цифровых двойников бизнес–процессов, что важно для учета не только состава операций, но и их длительности, очередности, взаимного влияния и связи с ресурсами [6].

Совместное использование BPMN и цифрового двойника можно представить как переход от статического процессного описания к управляемому цифровому контуру. BPMN задает логику процесса: начало и завершение, последовательность задач, правила переходов, возможные исключения, взаимодействие подразделений и информационных систем. Цифровой двойник дополняет эту схему фактическими данными: временем выполнения операций, частотой возвратов на доработку, загрузкой исполнителей, задержками между действиями и отклонениями от целевого маршрута. Поэтому BPMN отвечает на вопрос о том, как процесс должен быть устроен, а цифровой двойник – о том, как процесс реально функционирует и какие последствия будут иметь изменения.

Минимальная структура цифрового двойника бизнес–процесса должна включать BPMN–модель, журнал событий, справочники ролей и ресурсов, показатели эффективности, правила маршрутизации и сценарный блок. Журнал событий должен содержать идентификатор экземпляра процесса, наименование операции, время начала и завершения, исполнителя, статус и ссылку на информационную систему–источник. В Process Mining Manifesto подчеркивается значение событийных данных как основы анализа процессов: события позволяют сопоставлять фактическое поведение процесса с моделью, выявлять отклонения и находить узкие места [7].

На практике внедрение такого подхода целесообразно начинать с выбора процесса, который имеет повторяемый характер и достаточную цифровую следимость. К таким процессам могут относиться закупки, согласование договоров, обработка заявок на ремонт, управление заказами, подготовка проектной документации, учет замечаний, снабжение и планирование технического обслуживания. Полноценный цифровой двойник не нужен для каждого процесса: если процесс выполняется редко или зависит преимущественно

от уникальных экспертных решений, на первом этапе достаточно BPMN–модели и базового набора показателей.

Методический подход к внедрению включает несколько последовательных действий. Сначала необходимо определить владельца процесса и границы анализа, затем построить BPMN–модель «как есть» с участием исполнителей и аналитиков. После этого выбираются показатели, которые действительно отражают качество процесса: длительность цикла, время ожидания, доля возвратов, количество ручных операций, уровень загрузки исполнителей, частота нарушений регламентных сроков. Далее настраивается сбор событийных данных из ERP, CRM, EAM, электронного документооборота, систем управления проектами или иных корпоративных информационных систем.

После формирования начального набора данных выполняется сопоставление фактических событий с элементами BPMN–модели. На этом этапе выявляются расхождения между регламентной схемой и реальным выполнением: обход обязательных согласований, дополнительные неформальные проверки, задержки между задачами, чрезмерная последовательность операций, которые могут выполняться параллельно. Затем в цифровом двойнике проверяются возможные изменения: перераспределение ролей, изменение шлюзов согласования, автоматизация уведомлений, сокращение числа ручных вводов, перевод части проверок в параллельный режим.

Доррер описывает прототип цифрового двойника бизнес–процессов на базе системы ELMA, где для прогнозирования параметров процесса используется аппарат GERT–сетей [8]. Такой пример показывает, что цифровой двойник бизнес–процесса может быть не только визуальной панелью, но и расчетной моделью, поддерживающей прогнозирование длительности и оценку вариантов выполнения. В исследованиях Bano и соавторов рассматривается синтез process–aware digital twin cockpit на основе event logs, что подтверждает важность связи цифрового двойника с журналами событий, а не только с экспертно нарисованной схемой [9].

Для российских предприятий особое значение имеет отраслевой контекст. Подборнова рассматривает влияние цифровых двойников на оптимизацию бизнес–процессов промышленных предприятий и связывает их применение с повышением эффективности управленческих решений [10]. Сухоруков, Семикашев, Ерошкин и соавторы описывают эволюцию от текстового, табличного и графического описания процессов к имитационному моделированию и цифровым двойникам предприятий в реальном времени; отдельно отмечается значение таких решений для отраслей российского ТЭК [11]. Это делает тему актуальной для предприятий энергетики, нефтегазового сектора и строительства, где процессы связаны с большим числом участников, длительными согласованиями и высокой стоимостью ошибок.

Возможные области применения подхода в ТЭК включают управление техническим обслуживанием и ремонтом, обработку заявок на устранение дефектов, планирование ресурсов подрядчиков, согласование нарядов–допусков, управление закупками критически важных материалов и контроль исполнения инвестиционных проектов. В строительстве цифровой двойник бизнес–процесса может применяться для анализа согласования проектной документации, обработки замечаний, управления изменениями, взаимодействия заказчика и подрядчиков, а также контроля сроков поставки материалов. В этих случаях BPMN фиксирует нормативную логику взаимодействия, а цифровой двойник позволяет оценить фактические задержки и последствия организационных изменений.

Головцова и Ким рассматривают цифровой двойник как инструмент повышения эффективности и качества бизнес–процессов, подчеркивая его связь с анализом деятельности организации и поиском резервов улучшения. Однако эффект от внедрения не возникает автоматически. Если предприятие ограничится построением схемы или панели мониторинга, не обеспечив качество данных и управленческий цикл обратной связи, цифровой двойник останется формальным инструментом. Поэтому необходимо заранее определить ответственных за данные, правила обновления модели, порядок проверки гипотез и процедуру утверждения изменений в процессе.

Ключевыми рисками являются низкое качество исходных данных, неполное покрытие процесса информационными системами, несогласованность справочников, сопротивление исполнителей и отсутствие единой методики моделирования. Отдельное внимание требуется вопросам информационной безопасности: цифровой двойник бизнес–процесса может включать сведения о договорах, подрядчиках, сотрудниках, сроках исполнения и технических объектах. Следовательно, при проектировании необходимо определить права доступа, состав обезличиваемых данных, порядок хранения журналов событий и правила использования аналитических результатов.

Результатом совместного применения BPMN и цифрового двойника должна стать не разовая оптимизация, а постоянный цикл управления процессом. Сначала строится модель «как есть», затем собираются и очищаются данные, после этого выявляются отклонения и узкие места, далее проверяются сценарии улучшения, формируется модель «как должно быть», а результаты внедрения снова измеряются через события. Такой цикл позволяет снижать зависимость решений от субъективных оценок и переводить процессное управление в режим регулярной проверки гипотез.

Таким образом, BPMN и цифровые двойники решают разные, но взаимодополняющие задачи. BPMN обеспечивает единый язык описания процесса и делает видимой его структуру, а цифровой двойник связывает эту структуру с фактическими данными исполнения и сценарным анализом. Наиболее

рациональным является поэтапное внедрение: от качественной BPMN–модели и настройки событийных данных к построению цифрового двойника, проверке сценариев и закреплению улучшений в целевой модели процесса. Для предприятий ТЭК, строительства и промышленности такой подход может быть полезен при оптимизации процессов, где высокая стоимость задержек сочетается с большим числом согласований и цифровых следов в информационных системах.

Список литературы:

1. Business Process Model and Notation (BPMN), Version 2.0.2 [Электронный ресурс] // Object Management Group. – URL: https://www.omg.org/spec/BPMN/2.0.2/PDF (дата обращения: 02.07.2026).

2. Моделирование информационных потоков в нотации BPMN в Business Studio 5 [Электронный ресурс] // Bmp3. – URL: https://bpm3.ru/wp-content/uploads/2023/01/Modelirovanie-informatsionnyh-potokov-v-notatsii-BPMN-v-Business-Studio-5_Repin_2023.pdf?ysclid=mrfloclnq1130367349 (дата обращения: 02.07.2026).

3. What Is A Digital Twin? [Электронный ресурс] // Digital Twin. – URL: https://www.digitaltwinconsortium.org/initiatives/the-definition-of-a-digital-twin/ (дата обращения: 02.07.2026).

4. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 9 с/

5. Fornari F. Digital twins of business processes: a research manifesto / F. Fornari, I. Compagnucci, M. Callisto De Donato [et al.] // Internet of Things. – 2025. – Vol. 30. – 101477 p. DOI: 10.1016/j.iot.2024.101477 EDN: TQLOHA

6. Казаков О. Д. Цифровые двойники бизнес–процессов: пространственно–временной слой / О. Д. Казаков, Н. Ю. Азаренко // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: «Естественные и технические науки». – 2022. – № 4–2. – С. 60–67. DOI: 10.37882/2223–2966.2022.04–2.18 EDN: CLRXMC

7. Process Mining Manifesto [Электронный ресурс] // ResearchGate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/312596232_Process_Mining_Manifesto (дата обращения: 02.07.2026).

8. Доррер М. Г. Реализация цифрового двойника бизнес–процессов на базе системы ELMA / М. Г. Доррер // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2021. – № 1 (17). – С. 35–43. DOI: 10.47501/ITNOU.2021.1.035–043 EDN: UWTIOV

9. Bano D. Process–aware digital twin cockpit synthesis from event logs / D. Bano, J. Michael, B. Rumpe, S. Varga, M. Weske // Journal of Computer Languages. – 2022. – Vol. 70. – 101121 p. DOI: 10.1016/j.cola.2022.101121 EDN: EEMROS

10. Подборнова Е. С. Влияние цифровых двойников на оптимизацию бизнес–процессов промышленных предприятий / Е. С. Подборнова // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. – 2024. – Т. 15, № 4. – С. 177–186. DOI: 10.18287/2542–0461–2024–15–4–177–186 EDN: TFTRHI

11. Сухоруков А. И. Эволюция от простого описания бизнес–процессов к цифровым двойникам предприятий / А. И. Сухоруков, В. В. Семикашев, С. Ю. Ерошкин [и др.] // Научные труды ИНП РАН. – 2024. – Т.22, № 2. – С. 95-123. DOI: 10.47711/2076–3182–2024–2–95–123 EDN: BZEHJZ

УДК 621.923

Мишина Ю. В.
Научный руководитель: Янкин И. Н., д.т.н., профессор
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

СРЕДСТВА РЕГИСТРАЦИИ КОЛЕБАНИЙ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ И ОЦЕНКИ ИХ ВЛИЯНИЯ НА ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ

Аннотация. Статья посвящена анализу современных средств регистрации механических колебаний в зоне резания и оценке их влияния на качественные и количественные характеристики процесса резания. Рассмотрены основные типы датчиков вибрации, методология их применения, роль полученных данных в диагностике состояния режущего инструмента и оптимизации режимов обработки. Исследованы взаимосвязи между амплитудой колебаний, износом инструмента и параметрами обработанной поверхности. Предложены практические подходы к интеграции систем вибромониторинга в технологический процесс для повышения его эффективности и надёжности.
Ключевые слова: колебания, вибрация, регистрация, датчики, акселерометры, зона резания, износ инструмента, диагностика, мониторинг, технологический процесс.

Проблема контроля и анализа механических колебаний в зоне резания остаётся актуальной в машиностроительной отрасли на протяжении нескольких десятилетий. Колебания, возникающие при взаимодействии режущего инструмента с заготовкой, представляют собой сложное физическое явление, обусловленное целым комплексом факторов: нестабильностью сил резания, нарушением геометрии режущей кромки, люфтами в направляющих станка и, в особенности, самовозбуждением колебательной системы станок–приспособление–инструмент–деталь. Почему именно вибрационный контроль занимает приоритетное место в системах технической диагностики? Ответ кроется в том, что колебания являются, по сути, отражением всех происходящих в технологической системе изменений – от градиента температурных полей в зоне резания до начальных признаков разрушения режущей кромки [1, с. 45].

Значимость вибрационного анализа для проектирования и эксплуатации обрабатывающего оборудования обусловлена несколькими факторами. Во–первых, точность обрабатываемых деталей напрямую определяется уровнем механических колебаний станка. Смещение инструмента всего на несколько микрометров вследствие вибраций может привести к браку в партии изделий, требующих высокой точности. Во–вторых, амплитуда и спектральный состав колебаний отражают состояние режущего инструмента – его износ, образование наростов, а также риск катастрофического отказа. В–третьих,

вибрационный мониторинг позволяет оптимизировать режимы резания в реальном времени, снижая потребление энергии и повышая производительность [2, с. 78].

Процесс резания сопровождается генерацией колебаний на различных частотах. Низкочастотные колебания (до 100 Гц) связаны в основном с неравномерностью сил резания и регенеративным эффектом, при котором неровная обработанная поверхность, взаимодействуя с режущей кромкой, вызывает периодические возмущения. Среднечастотные колебания (100–1000 Гц) обусловлены собственными частотами колебаний технологической системы. Высокочастотные колебания (выше 1 кГц) возникают вследствие микропластического деформирования материала заготовки и характеристик взаимодействия трущихся поверхностей инструмента и стружки. Полный спектр этих колебаний несёт информацию о состоянии процесса, и именно поэтому правильный выбор средств регистрации является ключевой задачей [3, с. 180]. Регистрация колебаний в зоне резания осуществляется посредством различных типов датчиков, каждый из которых обладает специфическими характеристиками, определяющими его применимость в конкретной технологической ситуации.

Наиболее распространённым и надёжным методом регистрации вибраций являются пьезоэлектрические акселерометры. Принцип их работы основан на пьезоэлектрическом эффекте: при механическом воздействии пьезоэлектрический кристалл (обычно из керамики или монокристаллического кварца) деформируется и генерирует электрический сигнал, пропорциональный приложенному ускорению. Акселерометры этого типа обладают широким диапазоном частотной характеристики – от 1 Гц до 25 кГц и более, что позволяет захватить весь спектр релевантных для резания колебаний. Чувствительность пьезоэлектрических датчиков составляет обычно 10–100 мВ/g, где g – ускорение свободного падения, что обеспечивает высокую точность измерений даже при малых амплитудах вибраций [4, с. 34].

Однако пьезоэлектрические акселерометры имеют и существенные ограничения. Во–первых, они требуют специального усилителя сигнала и предварительного усиления перед аналого–цифровым преобразованием, что усложняет аппаратуру регистрации. Во–вторых, при монтаже датчика необходимо обеспечить надёжный контакт между базой акселерометра и поверхностью вибрирующей детали, в противном случае качество регистрации резко снижается. В–третьих, само присутствие датчика, имеющего ненулевую массу (обычно 5–50 г), изменяет динамические характеристики технологической системы, что может привести к искажению регистрируемого сигнала. Масса датчика должна быть как минимум в 10–20 раз меньше, чем эффективная масса вибрирующего элемента, чтобы влияние на результаты было пренебрежимо малым.

В последние годы всё большее распространение получают микроэлектромеханические системы (МЭМС) акселерометры. Эти устройства изготавливаются на основе микромеханических структур на кремниевой подложке и обладают рядом преимуществ над пьезоэлектрическими аналогами. МЭМС–акселерометры имеют существенно меньший размер и массу (часто менее 1 г), что уменьшает их влияние на динамику системы. Они обладают более высоким разрешением по амплитуде, часто достигающим 0,01 m/s^2 и лучше, что критично для выявления ранних признаков износа инструмента. Низкий уровень дрейфа и стабильность характеристик при температурных колебаниях делают МЭМС–датчики привлекательными для использования в промышленной среде, где температура в зоне резания может колебаться в широких пределах [5, с. 52].

Характеристики выбираемого датчика должны соответствовать ожидаемым параметрам колебаний. Типичные уровни ускорений при резании составляют 5–50 g при низких частотах и 2–10 g при высоких частотах. Таким образом, предел измерения датчика должен быть выбран с запасом в 20–30 % выше максимально ожидаемого ускорения. Частотная полоса датчика определяется диапазоном частот, релевантных для контроля процесса. Для общей оценки состояния рекомендуется диапазон 10 Гц – 10 кГц, однако для диагностики специфических видов отказов (например, образование наростов на режущей кромке) требуется расширение полосы до 20–25 кГц.

Размещение датчика на технологической системе является критическим моментом, от которого зависит качество регистрации и информативность полученных данных. Оптимальным местом установки акселерометра считается точка, максимально близкая к зоне резания и закреплённая таким образом, чтобы датчик отвечал на составляющие вибрации в радиальном и тангенциальном направлениях относительно оси резания. При обработке деталей на токарном станке датчик обычно крепится на державке режущего инструмента или на корпусе прижимного механизма. При фрезеровании датчик располагают на боку шпинделя или на консоли станка. При обработке на многоцелевых станках часто устанавливают несколько датчиков по трём координатным осям для полного описания вибрационного состояния.

Монтаж датчика производится несколькими способами. Постоянное винтовое крепление обеспечивает наиболее надёжный контакт и используется в лабораторных условиях. Магнитное крепление удобно для мобильной диагностики, однако его применение ограничено при больших ускорениях. Клеевое крепление на двусторонний скотч или специальный полимерный клей позволяет быстро устанавливать и снимать датчик, но требует предварительной подготовки поверхности и может быть ненадёжным при интенсивных вибрациях и нагреве. В технологической практике наиболее

распространённым является крепление с помощью специального стержня, вставляемого в подготовленное отверстие на детали контроля.

После регистрации сигналов вибрации необходимо их предварительная обработка и анализ. Сырые данные, поступающие с датчика, представляют собой временной ряд ускорений с частотой дискретизации, обычно выбираемой в диапазоне 5–50 кГц в зависимости от требуемой частотной полосы.

Для выявления характерных признаков состояния процесса применяют спектральный анализ с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ), которое преобразует сигнал из временной области в частотную. При анализе спектра мощности вибрации внимание уделяется следующим характеристикам: общему уровню вибрации (интегралу спектра по всему диапазону частот), амплитудам пиков на частотах собственных колебаний системы, наличию гармоник и боковых полос, которые указывают на модуляцию сигнала [6, с. 88].

Огибающая спектра, или высокочастотное ускоренное огибающее спектра (High–Frequency Envelope Spectrum, HFES), является весьма информативной характеристикой для диагностики начальных стадий отказа инструмента. Этот метод предполагает фильтрацию сигнала в высокочастотной области (обычно 2–25 кГц), детектирование амплитуды огибающей и последующее БПФ. Таким образом выявляются низкочастотные модуляции высокочастотных составляющих, которые часто указывают на развитие дефектов режущей кромки раньше, чем они проявятся в общем спектре вибрации.

Корреляция между уровнем вибрации и состоянием режущего инструмента является нелинейной и зависит от множества факторов. На начальном этапе работы острого инструмента вибрации минимальны и отражают лишь собственные шумы технологической системы. По мере накопления износа и образования площадки износа на задней поверхности режущей кромки вибрации постепенно возрастают. Однако это возрастание идёт медленно и скрывается в общем уровне вибрации. Критическое значение наступает тогда, когда площадка износа достигает размера 0,5–1,0 мм, и в этой момент вибрационная активность может скачкообразно возрасти. Дальнейшее развитие отказа может сопровождаться либо монотонным возрастанием вибраций, либо, наоборот, их скачкообразным снижением при расслоении режущей кромки и отколе части инструмента.

Одним из наиболее опасных явлений в процессе резания является самовозбуждение колебаний, называемое дребезгом или чаттерингом. Это явление возникает в результате взаимодействия между вибрирующей режущей кромкой и обработанной поверхностью: неровности на обработанной поверхности, волнистость с периодом, соответствующим

половине длины волны собственного колебания системы, вызывают новые возмущения, которые синхронизируются с собственными колебаниями технологической системы. Результатом является экспоненциальный рост амплитуды колебаний, который может привести к разрушению инструмента за считаные секунды. Вибрационный мониторинг позволяет выявить начало этого процесса по скачкообразному изменению спектра вибрации, появлению боковых полос вокруг основных частот колебаний и резкому возрастанию дисперсии сигнала [7, с. 112].

Влияние вибраций на качество обработанной поверхности является непосредственным. При наличии колебаний с амплитудой несколько микрометров режущая кромка оставляет волнистый след на поверхности, что приводит к возникновению виброотпечатков. Волнистость поверхности может быть количественно оценена через параметр Wa (волнистость в мкм), и экспериментальные данные показывают, что при колебаниях с амплитудой 10 мкм волнистость обработанной поверхности возрастает примерно в 5–10 раз. Кроме того, локальные пики напряжений в материале при вибрациях приводят к микропластическому деформированию, которое создаёт остаточные напряжения в поверхностном слое детали. Это может ускорить зарождение трещин при эксплуатации деталей в условиях циклического нагружения.

Вибрационные колебания также влияют на образование стружки и на процессы в зоне резания. При интенсивных вибрациях прерывистый характер резания приводит к периодическому изменению толщины срезаемого слоя, что вызывает соответствующие колебания сил резания. Эти колебания сил, в свою очередь, являются источником дополнительных вибраций технологической системы, создавая положительную обратную связь. Измерения температуры в зоне резания при наличии вибраций показывают, что в области непосредственного контакта инструмента и стружки формируются локальные перегревы до 700–800 °C, в то время как в отсутствие вибраций температура составляет около 600 °C при тех же режимах обработки. Эти локальные перегревы значительно ускоряют диффузионный износ инструмента, особенно при обработке сталей и чугуна. Результатом является снижение стойкости инструмента – при наличии вибраций с амплитудой 20–30 мкм стойкость инструмента может сократиться на 30–50 % по сравнению с благоприятными условиями обработки.

Интегрированные системы мониторинга состояния технологических станков в реальном времени становятся всё более распространёнными на современных предприятиях. Такие системы обычно включают в себя массив акселерометров, встроенных в различные точки станка, управляющий компьютер с программным обеспечением для обработки сигналов, а также интерфейсы для связи со станком и системой управления. Основная идея состоит в том, чтобы постоянно мониторить вибрационное состояние

оборудования и, при обнаружении отклонений от установленных норм, выдавать предупреждения оператору или автоматически корректировать режимы обработки [8, с. 215].

Существуют несколько подходов к интерпретации данных вибрационного мониторинга. Наиболее простой – это сравнение текущего уровня вибрации с установленным лимитом. Однако этот подход игнорирует информацию о спектральном составе вибрации и не позволяет различать различные типы неисправностей. Более продвинутые методы основаны на анализе трендов – прослеживание того, как изменяются со временем различные параметры вибрации (общий уровень, амплитуды на характерных частотах, энергия в определённых полосах). Критические пороги определяются не абсолютными значениями, а скоростью изменения параметров. Например, если энергия вибрации в полосе 1–5 кГц возрастает более чем на 5 % в день, это может указывать на развивающийся процесс износа, требующий внимания.

Машинное обучение и искусственные нейронные сети всё чаще применяются для классификации состояний технологической системы по вибрационным данным. На этапе обучения системе предоставляются примеры вибрационных сигналов, соответствующих различным состояниям: нормальное функционирование, начинающийся износ инструмента, развитый износ, дребезг, попадание стружки в зону резания и т.д. Нейронная сеть учится распознавать характерные признаки каждого состояния в пространстве признаков, построенном на основе временных, частотных и энергетических параметров сигнала. После обучения система может в реальном времени предсказывать состояние технологического процесса и выдавать специфические рекомендации по коррекции режимов [9, с. 220].

Несмотря на очевидные преимущества систем вибромониторинга, следует признать наличие существенных проблем и ограничений в их практическом применении. Во–первых, стоимость оборудования и программного обеспечения остаётся высокой, особенно для малых и средних предприятий. Во–вторых, внедрение таких систем требует обучения персонала, что часто встречает сопротивление со стороны операторов и мастеров, привыкших к традиционным методам контроля. В–третьих, система вибромониторинга даёт наиболее эффективные результаты при условии, что характеристики техпроцесса заранее хорошо изучены, и для каждого сочетания режимов обработки установлены критические пороги вибрации. На практике это требует проведения предварительных исследований, которые отнимают время и ресурсы.

Кроме того, существует фундаментальная проблема, связанная с интерпретацией вибрационных сигналов. Один и тот же уровень вибрации может быть следствием совершенно различных причин: износа инструмента,

люфта в подшипниках, дисбаланса шпинделя, попадания стружки и т.д. Без дополнительной информации о техническом состоянии оборудования, истории обслуживания и текущих режимах обработки невозможно однозначно установить причину возникших колебаний. Следовательно, система вибромониторинга не может рассматриваться как автономное диагностическое средство, а только как один из компонентов комплексной системы технического контроля и диагностики.

Практическое применение вибрационного контроля также осложняется вариативностью условий в производстве. Вибрационные характеристики одного и того же технологического процесса могут существенно отличаться в зависимости от геометрии заготовки, её жёсткости, материала, состояния приспособления, степени выработки направляющих станка. Это означает, что пороги вибрации, установленные для одного условия обработки, могут быть неприменимы для другого. Требуется непрерывная адаптация алгоритмов диагностики к текущим условиям, что требует от системы значительной вычислительной мощности и гибкого программного обеспечения.

При проектировании и установке систем регистрации вибрации необходимо учитывать также влияние внешних электромагнитных помех и шумов в измерительной цепи. Силовое оборудование станка, частотные преобразователи, системы подачи охлаждающей жидкости – всё это может генерировать электромагнитные помехи, которые будут восприняты датчиком и исказят результаты измерения. Решение этой проблемы требует экранирования кабелей, использования дифференциальных усилителей и, в некоторых случаях, цифровой фильтрации сигналов. Современные системы мониторинга предусматривают встроенные фильтры шумов, но качество фильтрации зависит от уровня информационной подготовленности персонала, обслуживающего оборудование.

Эффективное использование данных о вибрациях возможно лишь при условии интеграции вибрационной информации с другими параметрами технологического процесса: силами резания, температурой в зоне резания, расходом охлаждающей жидкости, требуемой степенью шероховатости. На современных производствах всё более внедряются интегрированные системы сбора данных (АСУТП), в которых информация от датчиков различных типов консолидируется в единой базе данных. Такой подход позволяет строить многопараметрические модели состояния технологического процесса и принимать обоснованные решения о коррекции режимов. Например, при обнаружении повышенной вибрации и одновременно возросшей температуры в зоне резания логичным будет предположение об интенсивном износе инструмента, и соответствующая рекомендация будет направлена на замену инструмента или снижение скорости резания.

Перспективным направлением развития техники регистрации вибраций является применение оптических датчиков на основе лазерной интерферометрии и голографии. Такие датчики позволяют бесконтактно регистрировать смещения и колебания объектов без механического воздействия на систему. Однако в настоящее время их применение ограничено высокой стоимостью, сложностью юстировки в условиях производства и невозможностью использования при наличии вибрирующих непрозрачных экранов. Вероятно, эти методы будут иметь применение в лабораторных исследованиях и при разработке высокопроизводительных станков, но не станут массовым решением в ближайшие 5–10 лет.

Заключительный аспект рассмотрения – это правовая и нормативная база применения вибрационного контроля. В Российской Федерации действуют государственные стандарты, регламентирующие методы измерения и оценки вибрации. ГОСТ Р 72040.1–2025 устанавливает общие положения по измерению вибрации оборудования, включая производство машин и механизмов. ГОСТ Р ИСО 20816–3–2023 определяет нормы вибрации для различных классов машин и оборудования. Требование к применению вибрационной диагностики в целях профилактического обслуживания основано на международных стандартах ISO 10816 и ISO 20816, которые регулярно обновляются с учётом развития техники и накопленного опыта [10].

Таким образом, средства регистрации колебаний в зоне резания являются неотъемлемой частью современной системы технического контроля и диагностики технологических процессов. Пьезоэлектрические и МЭМС–акселерометры обеспечивают надёжную регистрацию вибраций в широком диапазоне частот и амплитуд. Спектральный анализ и методы обработки сигналов позволяют извлекать информацию о состоянии режущего инструмента и динамических характеристиках технологической системы. Интегрированные системы мониторинга в реальном времени предоставляют средства для своевременного выявления отклонений и оптимизации режимов обработки.

Однако в условиях производства применение вибрационного контроля требует комплексного подхода, интеграции с другими методами диагностики, и постоянного совершенствования алгоритмов анализа данных. Продолжающееся развитие способов регистрации и обработки вибрационной информации открывает новые возможности для повышения качества и производительности технологических процессов в машиностроении.

Список литературы:

1. Диагностика автоматизированного производства / С.Н. Григорьев, В.Д. Гурин, М.П. Козочкин и др.; под. ред. С.Н. Григорьева. – М.: Машиностроение, 2011. – 600 с.

2. Grigoriev S.N., et al. Investigation of the Information Possibilities of the Parameters of Vibroacoustic Signals Accompanying the Processing of Materials by Concentrated Energy Flows // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 2. – P. 750. DOI: 10.3390/s23020750 EDN: XBEKH

3. Янчич В. В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры): монография / Янчич В.В. – Ростов–на–Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2010. – 303 с. EDN: QMHIYH

4. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден; пер. с англ. Ю. А. Заболотной; под ред. Е.Л. Свинцова. – Москва: Техносфера, 2006. – 592 с.

5. Алейников Д.П., Лукьянов А.В., Костин П.Н. Использование МЭМС-акселерометров для вибромониторинга механообрабатывающих центров // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 2 (62). – С. 14-20. DOI:10.18324/2077-5415-2024-2-14-20

6. Рыжкин, А. А. Обработка материалов резанием : учебное пособие / А. А. Рыжкин, К. Г. Шучев, М. М. Климов. – Ростов-на-Дону : Издательство Феникс, 2008. – 411 с. – ISBN 978-5-222-14019-2. – EDN SXTACR.

7. Лютов А. Г. Электропривод в системе автоматического регулирования процесса резания: учебное пособие / А. Г. Лютов, Г. Н. Коуров, Н. Г. Река. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 140 с.

8. Колобов А. Б. Вибродиагностика: теория и практика: учебное пособие / А. Б. Колобов. – 2-е изд. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 252 с.

9. Панин Е.П. Прогнозирование технического состояния оборудования на основе ансамблевых методов машинного обучения // Вестник науки. – 2025. – Т. 5-1, № 6 (87). – С. 683-689.

10. ГОСТР 72040. 1 – 2025/ ISO/TR 17243-1: 2014. Вибрация. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния металлорежущих станков. Часть 1. Вибрация шпинделей с встроенным электродвигателем на подшипниках качения с номинальной частотой вращения от 600 до 30 000 мин-1 // М.: Российский институт стандартизации, 2025. – 16 с.

УДК 004.056.5

Брагина Е. А., Рунова В. В.
Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, Россия

МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-АУДИТА КОНФИГУРАЦИЙ СЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ CISCO ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИЗНАКОВ УЯЗВИМОСТИ SMART INSTALL (CVE-2018-0171)

Аннотация. В статье предложена и апробирована методика неразрушающего экспресс-аудита сетевого оборудования Cisco для выявления признаков уязвимой конфигурации функции Smart Install, связанной с уязвимостью CVE-2018-0171 (CWE-787, переполнение буфера в неаутентифицированном протоколе на TCP/4786; техника MITRE ATT&CK T1190). Методика основана на пассивных средствах — сканировании портов и анализе сетевого трафика — и формализованном критерии отнесения устройства к потенциально уязвимым без выполнения деструктивного воздействия. Апробация проведена на реальном оборудовании учебного киберполигона (коммутатор Cisco Catalyst 2960) методом контрольного сравнения. Выполнен сравнительный анализ компенсирующих мер защиты (обновление ПО, отключение сервиса командой no vstack, фильтрация трафика списками контроля доступа, мониторинг средствами IDS/IPS и SIEM) по критериям полноты покрытия угрозы, риска нарушения связности и трудозатрат. Проведена оценка актуальности угрозы по методике ФСТЭК России. Рассмотрены ограничения исследования и направления дальнейшей работы.

Ключевые слова: CVE-2018-0171, Cisco Smart Install, экспресс-аудит, vstack, TCP 4786, переполнение буфера, CWE-787, MITRE ATT&CK T1190, IDS/IPS, киберполигон, методика ФСТЭК, сетевая безопасность.

1. Введение

Коммутаторы доступа Cisco Catalyst образуют один из базовых уровней корпоративных сетей, в том числе на объектах топливно-энергетического комплекса, где надёжность сетевой инфраструктуры напрямую влияет на устойчивость технологических процессов. Сетевое оборудование всё чаще рассматривается как самостоятельная цель атак, а сервисные функции автоматизации, упрощающие массовое развёртывание устройств, нередко расширяют доступную нарушителю поверхность атаки.

Безопасное исследование подобных уязвимостей и отработка методов их обнаружения целесообразны в изолированной учебной инфраструктуре. В работе [1] предложены стратегии построения модели сети предприятия в рамках киберполигона для подготовки кадров в области кибербезопасности; авторы отмечают, что изолированные стенды позволяют исследовать уязвимости сетевого оборудования без риска для производственных систем. Близкие подходы к применению киберполигонов в образовательном процессе

рассматриваются в [2, 3]. Настоящее исследование выполнено в логике этого подхода — на изолированном учебном стенде.

Вопросы выявления попыток эксплуатации известных уязвимостей рассматриваются в исследованиях систем обнаружения вторжений. В [4] описана высокопроизводительная система обнаружения вторжений (IDS) для защиты передачи данных, в [5] выполнен обзор методов глубокого переноса обучения для обнаружения вторжений в сетях промышленных систем управления, а в [6] предложен подход «безопасность как функция» для размещения IDS/IPS в программно-определяемых сетях. Эти работы подтверждают, что сигнатурный и поведенческий анализ сетевого трафика является основным инструментом пассивного обнаружения эксплуатации сетевых уязвимостей.

Объектом исследования выступает функция Smart Install — технология «нулевой настройки» (zero-touch deployment) коммутаторов Cisco. Её архитектурная особенность — полное отсутствие аутентификации: обмен ведётся по TCP-порту 4786, а роль клиента активна по умолчанию. В 2018 году исследователи компании Embedi (Г. Носенко) раскрыли уязвимость CVE-2018-0171 — переполнение буфера в коде Smart Install Client, позволяющее неаутентифицированному нарушителю выполнить произвольный код или вызвать отказ в обслуживании [7, 8]. Уязвимость получила оценку CVSS 9.8 (Critical) [12] и включена CISA в каталог Known Exploited Vulnerabilities [13].

Практическая опасность подтвердилась незамедлительно: уже в апреле 2018 года наблюдалась массовая сканирующая кампания, в ходе которой атакующие удаляли конфигурацию уязвимых устройств [11]. Несмотря на наличие исправлений, по данным Cisco Talos уязвимость использовалась государственными группировками (Static Tundra, Salt Typhoon) для компрометации сетевого оборудования вплоть до 2025 года [9, 10]. С точки зрения классификации дефект относится к записи за границы буфера (CWE-787) [15], а его эксплуатация соответствует технике T1190 (Exploit Public-Facing Application) матрицы MITRE ATT&CK [14].

В отличие от перечисленных работ, посвящённых построению киберполигонов [1–3] и общим архитектурам IDS/IPS [4–6], настоящее исследование сфокусировано на прикладной задаче — разработке формализованной методики неразрушающего экспресс-аудита, позволяющей по сетевым признакам отнести устройство Cisco к потенциально уязвимым по CVE-2018-0171 без деструктивного воздействия, а также на сравнительном анализе компенсирующих мер защиты по критериям полноты покрытия, риска нарушения связности и трудозатрат. Базовая метрика CVSS не отражает контекст развёртывания, поэтому опасность дополнительно оценивается по методике ФСТЭК России.

Цель работы — разработка и апробация методики неразрушающего экспресс-аудита сетевого оборудования Cisco для выявления признаков уязвимой конфигурации Smart Install, связанной с CVE-2018-0171, и сравнительный анализ эффективности мер снижения риска её эксплуатации.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. проанализировать архитектуру и протокол функции Smart Install и условия активации уязвимости;
2. определить термины и критерий отнесения устройства к потенциально уязвимым;
3. разработать методику неразрушающего экспресс-аудита на основе сканирования портов и анализа трафика;
4. апробировать методику на реальном оборудовании методом контрольного сравнения;
5. выполнить сравнительный анализ компенсирующих мер защиты и оценку актуальности угрозы по методике ФСТЭК России;
6. определить ограничения исследования и направления дальнейшей работы.

2. Термины и определения

Терминология приведена в соответствие с ГОСТ 34.003-90 [17] и ГОСТ Р 56939-2016 [16]; понятия угрозы и уязвимости трактуются согласно методическим документам ФСТЭК России [18].

Уязвимость — недостаток программного обеспечения, аппаратного средства или конфигурации системы, который может быть использован нарушителем для реализации угроз безопасности информации (в соответствии с трактовкой ФСТЭК России).

Поверхность атаки — совокупность интерфейсов, сервисов, протоколов и иных компонентов информационной системы, доступных потенциальному нарушителю для осуществления воздействия.

Цепочка атаки — последовательность действий нарушителя, направленных на достижение цели несанкционированного воздействия посредством эксплуатации одной или нескольких уязвимостей.

Неаутентифицированный сервис — сетевой сервис, предоставляющий возможность взаимодействия без предварительного подтверждения подлинности пользователя или устройства.

Обнаружение вторжений — процесс выявления признаков несанкционированной деятельности в информационной системе посредством анализа событий безопасности и сетевого трафика.

Экспресс-аудит — ускоренная неразрушающая проверка конфигурации сетевого устройства на наличие признаков известной уязвимости без выполнения эксплуатации и без модификации состояния устройства.

3. Постановка задачи и критерий аудита

Поскольку отправка эксплуатирующего пакета сопряжена с риском отказа в обслуживании оборудования, методика опирается не на факт эксплуатации, а на выявление сетевых признаков уязвимой конфигурации. Открытый неаутентифицированный сервис Smart Install является признаком потенциально уязвимой конфигурации, который в сочетании с уязвимой версией ПО образует условие эксплуатируемости CVE-2018-0171.

Формализуем критерий аудита в виде проверяемых гипотез:

- H_0 (нулевая): доступный неаутентифицированный сервис Smart Install на устройстве отсутствует (порт 4786 закрыт либо соединение сбрасывается) — признак уязвимой конфигурации не выявлен;
- H_1 (альтернативная): сервис Smart Install активен и принимает неаутентифицированные TCP-соединения на порту 4786 — выявлен признак уязвимой конфигурации, требующий проверки версии ПО.

Критерий принятия H_1: утилита Nmap фиксирует состояние порта 4786/tcp как open (сервис smart-install) и в захвате трафика наблюдается завершённое TCP-рукопожатие (SYN → SYN/ACK → ACK) без аутентификации; устройство классифицируется как потенциально уязвимое и подлежит проверке версии IOS (show version) и роли (show vstack config). Критерий принятия H_0: порт closed/filtered, соединение завершается сбросом (RST) без установления сессии.

4. Техническое описание уязвимости

4.1 Архитектура и протокол Smart Install

Smart Install обеспечивает автоматическую загрузку образа ОС и конфигурации на новые устройства без участия администратора. В архитектуре выделяются роли «директор» (director), управляющий развёртыванием, и «клиент» (client) — развёртываемое устройство. Взаимодействие ведётся по протоколу Smart Install поверх TCP на порту 4786. Роль client активна по умолчанию на коммутаторах, прошивка которых не обновлена с учётом исправления Cisco bug ID CSCvd36820. Протокол не предусматривает аутентификации: любое устройство в сегменте способно отправить клиенту управляющее сообщение. Устройства, сконфигурированные исключительно как director, уязвимости не подвержены.

4.2 Механизм уязвимости

CVE-2018-0171 обусловлена некорректной проверкой данных пакета (improper validation of packet data) в коде Smart Install Client. Специально сформированное сообщение, отправленное на TCP/4786, вызывает переполнение буфера в стеке (CWE-787). В зависимости от полезной нагрузки это приводит к аварийной перезагрузке устройства (DoS), зацикливанию с последующим срабатыванием сторожевого таймера (watchdog) либо к

выполнению произвольного кода. Отсутствие аутентификации означает возможность эксплуатации без авторизации (pre-auth RCE).

4.3 Классификация и затронутые платформы

Таблица 1. Классификационные параметры CVE-2018-0171

Параметр	Значение
Идентификатор CVE	CVE-2018-0171
Класс (CWE)	CWE-787: Out-of-bounds Write (переполнение буфера в стеке)
CVSS v3.0 Base	9.8 Critical; AV:N/AC:L/PR:N/UI:N/S:U/C:H/I:H/A:H
MITRE ATT&CK	T1190 (Exploit Public-Facing Application); T1602.002 (Network Device Configuration Dump); T1499 (Endpoint DoS)
Раскрытие	28.03.2018 (cisco-sa-20180328-smi2); обнаружена Embedi (Г. Носенко)
CISA KEV	Включена (активная эксплуатация подтверждена)
Условие эксплуатации	Smart Install client активен; TCP/4786 доступен; уязвимая версия IOS/IOS XE

Уязвимость затрагивает коммутаторы Cisco Catalyst (2960/2960-S/-X, 3560/3750/3850, 4500 и др.) и маршрутизаторы под управлением IOS/IOS XE с активным клиентом Smart Install. Устройства с версиями ниже IOS 12.2(52)SE не содержат функции и не подвержены уязвимости. Исправление поставляется в составе Cisco bug ID CSCvg76186; обходных решений, кроме отключения функции, не предусмотрено [8].

5. Методология экспресс-аудита

5.1 Лабораторный стенд

Апробация выполнена на реальном оборудовании изолированного учебного стенда (киберполигона) [1]. Состав стенда приведён в таблице 2.

Таблица 2. Состав лабораторного стенда

Компонент	Характеристики	Роль
Cisco Catalyst 2960	Cisco IOS (ветка 15.x); Vlan1 — 192.168.10.254; MAC 24:01:C7:35:57:C0	Объект аудита (целевое устройство)
ПК (исследователь)	ALT, интерфейс enp1s0; IP 192.168.10.10/24	Сканирование портов и анализ трафика
Консольный сервер	IP 10.19.103.27, порт 7010 (Telnet)	Управление конфигурацией коммутатора

Атакующий ПК и управляющий интерфейс коммутатора (Vlan1) находятся в подсети 192.168.10.0/24, что моделирует пользовательский

сегмент. Управление коммутатором ведётся через консольный сервер по протоколу Telnet с использованием PuTTY; трафик к порту Smart Install анализируется на интерфейсе enp1s0 средствами Wireshark.

5.2 Средства и порядок аудита

Методика реализуется штатными неразрушающими средствами: Nmap (сканирование TCP/4786 и идентификация сервиса), Wireshark (захват и анализ трафика), PuTTY (проверка конфигурации устройства). Порядок аудита: (1) сканирование порта 4786; (2) подтверждение приёма неаутентифицированных соединений анализом трафика; (3) проверка роли и версии ПО на устройстве; (4) классификация устройства по критерию раздела 3.

Из соображений безопасности оборудования отправка эксплуатирующего Smart Install-пакета не выполнялась; методика опирается на выявление сетевых признаков уязвимой конфигурации, что исключает риск отказа в обслуживании. Полная эксплуатация (RCE/DoS) рассматривается только теоретически.

5.3 Метод контрольного сравнения

Достоверность вывода обеспечивается принципом единственного изменяемого фактора, в качестве которого выступает состояние функции Smart Install (включена / отключена командой no vstack). Эксперимент 1 фиксирует состояние с включённым сервисом (проверка H_1), эксперимент 2 — после отключения (восстановление H_0 и проверка эффективности меры).

6. Апробация методики и результаты

6.1 Эксперимент 1 — выявление сервиса Smart Install (проверка H_1)

Выполнено сканирование управляющего адреса коммутатора (TCP connect-скан, не требующий прав на формирование «сырых» пакетов):

nmap -sT -p 4786 192.168.10.254

Результат сканирования:

Nmap scan report for 192.168.10.254

Host is up (0.0029s latency).

PORT STATE SERVICE

4786/tcp open smart-install

MAC Address: 24:01:C7:35:57:C0 (Cisco Systems)

Для подтверждения приёма неаутентифицированных соединений на интерфейсе enp1s0 выполнен захват трафика в Wireshark с фильтром tcp.port == 4786. Зафиксировано полное TCP-рукопожатие между ПК (192.168.10.10) и коммутатором (192.168.10.254):

24 192.168.10.10 -> 192.168.10.254 TCP 46370 -> 4786 [SYN]

25 192.168.10.254 -> 192.168.10.10 TCP 4786 -> 46370 [SYN, ACK]

26 192.168.10.10 -> 192.168.10.254 TCP 46370 -> 4786 [ACK]

27 192.168.10.10 -> 192.168.10.254 TCP 46370 -> 4786 [RST, ACK]

Ethernet II, Dst: Cisco_35:57:c0 (24:01:c7:35:57:c0)

Порт 4786/tcp находится в состоянии open, сервис идентифицирован как smart-install, MAC-адрес принадлежит Cisco Systems. Завершённое рукопожатие (кадры 24–26) подтверждает приём неаутентифицированных соединений; кадр 27 — корректное завершение сессии сканером. Согласно критерию раздела 3, выявлен признак уязвимой конфигурации; гипотеза H_1 принята, устройство классифицировано как потенциально уязвимое и подлежит проверке версии IOS.

6.2 Эксперимент 2 — проверка устранения признака (контроль)

Изменён единственный фактор: функция Smart Install отключена и сохранена в конфигурации:

Switch> enable
Switch# configure terminal
Switch(config)# no vstack
Switch(config)# end
Switch# write memory

Проверка командой show vstack config подтверждает отключение функции:

Switch# show vstack config
Role: Client (SmartInstall disabled)
Vstack Director IP address: 0.0.0.0

Повторный захват трафика показал, что после отключения попытка соединения с портом 4786 завершается немедленным сбросом со стороны коммутатора — рукопожатие не устанавливается:

230 192.168.10.10 -> 192.168.10.254 TCP 42634 -> 4786 [SYN]
231 192.168.10.254 -> 192.168.10.10 TCP 4786 -> 42634 [RST, ACK]

Порт 4786 перешёл в состояние closed, сервис более не принимает соединения. Признак уязвимой конфигурации устранён, состояние H_0 восстановлено, что подтверждает эффективность меры.

7. Анализ и обсуждение результатов

7.1 Сравнение состояний устройства

Таблица 3. Сравнение состояния устройства до и после устранения

Параметр	Smart Install включён	После no vstack
Порт 4786/tcp	open	closed
Сервис smart-install	активен	отключён
TCP-рукопожатие	завершается (SYN/SYN-ACK/ACK)	немедленный RST
show vstack config	SmartInstall enabled (по умолчанию)	SmartInstall disabled

Параметр	Smart Install включён	После no vstack
Признак уязвимой конфигурации	Выявлен (H_1)	Не выявлен (H_0)

7.2 Оценка актуальности угрозы по методике ФСТЭК

Согласно «Методике оценки угроз безопасности информации» ФСТЭК России (2021) угроза признаётся актуальной, если существует источник угрозы (нарушитель) с достаточным потенциалом и реализуем хотя бы один сценарий, приводящий к негативным последствиям [18]. Методика носит сценарно-качественный характер, в отличие от числового расчёта «вероятность × ущерб».

Таблица 4. Оценка актуальности угрозы по методике ФСТЭК

Критерий	Оценка для CVE-2018-0171
Источник угрозы (нарушитель)	Внешний нарушитель без легитимного доступа; требуется лишь сетевая достижимость порта 4786
Потенциал нарушителя	Низкий–средний: аутентификация не требуется, опубликован PoC (Embedi), доступны SIET и модуль Metasploit
Сценарий реализации	Отправка сформированного Smart Install-сообщения на TCP/4786 (T1190)
Негативные последствия	Нарушение конфиденциальности (экспорт конфигурации), целостности (подмена конфигурации/образа, RCE), доступности (DoS)
Вывод об актуальности	Угроза актуальна: подтверждена активная эксплуатация, в том числе государственными группировками [9, 10]

Угроза признаётся актуальной, уровень опасности — высокий, что согласуется с базовой метрикой CVSS 9.8 (Critical). Определяющие факторы — отсутствие аутентификации, активность функции по умолчанию и многолетняя эксплуатация в реальных атаках.

7.3 Потенциальные последствия эксплуатации

В терминах MITRE ATT&CK [14] CVE-2018-0171 обеспечивает первоначальный доступ (T1190) и открывает следующие векторы:

- несанкционированный экспорт конфигурации (running-config) с паролями и хешами — техника T1602.002 (Network Device Configuration Dump), ведущая к компрометации учётных данных и латеральному перемещению;
- выполнение произвольного кода (RCE) без аутентификации;
- отказ в обслуживании (T1499): перезагрузка устройства или зацикливание с аварийным завершением;

- разведка инфраструктуры: топология сети, VLAN, таблицы маршрутизации.

По оценкам исследователей Embedi и Rapid7, исторически в сети Интернет были доступны от 150 000 до 250 000 устройств с открытым сервисом Smart Install [7, 11]; подтверждённая эксплуатация в 2021–2025 годах [9, 10] подчёркивает масштаб угрозы.

8. Меры по устранению и обнаружению

8.1 Устранение уязвимости

Радикальной мерой является обновление ПО Cisco IOS/IOS XE до исправленной версии (Cisco bug ID CSCvg76186); обходных решений Cisco не предоставляет [8]. При невозможности обновления и неиспользовании функции сервис отключается командой no vstack (эффективность подтверждена в эксперименте 2):

```
Switch(config)# no vstack
```

8.2 Ограничение доступа и сегментация

Доступ к TCP-порту 4786 ограничивается списками контроля доступа (ACL) или вышестоящим межсетевым экраном до доверенных адресов, а сегментация сети исключает достижимость Smart Install из пользовательских и недоверенных сегментов. Данные меры снижают вероятность эксплуатации, но не устраняют саму уязвимость, поскольку уязвимый сервис продолжает функционировать.

8.3 Обнаружение средствами IDS/IPS и SIEM

В качестве компенсирующей меры применяется пассивное обнаружение средствами IDS/IPS на основе сигнатурного анализа трафика [4, 6]; для промышленных сегментов актуальны методы, рассмотренные в [5]. Контролируются обращения к TCP-порту 4786, прежде всего из нетипичных сегментов, и содержимое Smart Install-сообщений (проверки только открытого порта недостаточно из-за ложных срабатываний). Иллюстративная сигнатура Snort для выявления обращений к сервису:

```
alert tcp any any -> $NETWORK_DEVICES 4786 (msg:"Cisco Smart Install
 access attempt"; flow:to_server,established; flags:S; threshold:type
 limit, track by_src, count 1, seconds 60; classtype:attempted-recon;)
```

События IDS/IPS целесообразно агрегировать в SIEM с корреляцией по аномальной частоте обращений к порту 4786; реагирование организуется в соответствии с рекомендациями NIST SP 800-61 [19]. Эффективность подхода зависит от качества сигнатур и корректности настройки мониторинга.

8.4 Сравнительный анализ мер защиты

Эффективность компенсирующих мер различается по полноте покрытия угрозы, риску нарушения связности и трудозатратам (таблица 5).

Таблица 5. Сравнительный анализ мер защиты от эксплуатации CVE-2018-0171

Мера защиты	Полнота покрытия угрозы	Риск нарушения связности	Трудозатраты
Обновление IOS/IOS XE	Полное (устраняет причину)	Средний (окно обслуживания, перезагрузка)	Высокие (регламент, тестирование)
Отключение Smart Install (no vstack)	Полное (устраняет поверхность атаки)	Низкий (если SMI не используется)	Низкие (одна команда)
Ограничение доступа ACL	Частичное (сервис активен, ограничен доступ)	Средний (риск блокировки легитимного трафика)	Средние (поддержка списков)
Сегментация сети	Частичное (снижает достижимость)	Средний (изменение топологии)	Средние–высокие (архитектурная мера)
Мониторинг IDS/IPS + SIEM	Не устраняет, обеспечивает обнаружение	Отсутствует (пассивно)	Средние (настройка, эксплуатация)

Максимальный уровень защищённости достигается сочетанием устранения причины уязвимости (обновление ПО или отключение сервиса) со средствами мониторинга. Отключение Smart Install обеспечивает наилучшее соотношение полноты покрытия и трудозатрат при низком риске нарушения связности, тогда как ACL и сегментация выступают дополнительными ограничивающими мерами, а IDS/IPS и SIEM — компенсирующими средствами обнаружения.

9. Ограничения исследования

1. Апробация выполнена на единственной модели (Cisco Catalyst 2960); для повышения внешней валидности необходима проверка на платформах 3560/3750/3850 и других версиях IOS.
2. Методика выявляет признак уязвимой конфигурации (доступный сервис), но не подтверждает эксплуатируемость напрямую — требуется дополнительная проверка версии ПО; отправка эксплуатирующего пакета намеренно не выполнялась.
3. Не измерялось влияние обращений к сервису на загрузку CPU и память устройства.
4. Стенд представляет плоскую сеть без промежуточных IPS, WAF и ACL; в реальных сетях доступ к порту 4786 может быть ограничён.

5. Предложенная сигнатура IDS носит иллюстративный характер и в рамках работы не проходила нагрузочного тестирования на ложные срабатывания.

10. Заключение

Разработана и апробирована методика неразрушающего экспресс-аудита сетевого оборудования Cisco для выявления признаков уязвимой конфигурации Smart Install, связанной с CVE-2018-0171. Методика формализует критерий отнесения устройства к потенциально уязвимым по сетевым признакам и не требует деструктивного воздействия. На реальном оборудовании методом контрольного сравнения подтверждено, что в конфигурации по умолчанию признак уязвимости выявляется (H_1), а отключение функции командой no vstack его устраняет (H_0).

Выполнен сравнительный анализ компенсирующих мер защиты по полноте покрытия угрозы, риску нарушения связности и трудозатратам; показано, что устранение причины уязвимости целесообразно дополнять средствами мониторинга IDS/IPS и SIEM. Оценка по методике ФСТЭК России подтвердила актуальность угрозы и высокий уровень опасности, согласованный с базовой метрикой CVSS 9.8.

Практическая значимость работы состоит в применимости предложенной методики экспресс-аудита в учебных лабораториях, киберполигонах и корпоративных сетях для первичной оценки защищённости сетевой инфраструктуры. Перспективные направления — верификация на дополнительных платформах и версиях IOS, разработка и нагрузочное тестирование правил Snort/Suricata и Sigma для обнаружения эксплуатации, а также контролируемая демонстрация отказа в обслуживании в изолированном стенде.

Список литературы:

1. Греков В.С. Стратегии создания модели сети предприятия в рамках киберполигона для эффективной подготовки кадров в области кибербезопасности / В.С. Греков, А.Г. Уймин // Актуальные проблемы комплексной безопасности критически важных объектов топливно-энергетического комплекса. Тезисы докладов 78-й Международной молодёжной научной конференции, Москва, 2025. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2025. – С. 17–18. EDN: RVOSAN

2. Прохоров А. И. Киберполигон как современный инструмент обеспечения информационной безопасности / А. И. Прохоров // Информатизация в цифровой экономике. – 2023. – Т.4, №4. – 363-378. DOI: 10.18334/ide.4.4.119301 EDN: MZKANI

3. Кривоногов С. В. Внедрение киберполигона в образовательный процесс / С. В. Кривоногов // Управление образованием: теория и практика. – 2024. – №10-1. – 100-110. DOI: 10.25726/o3629-6381-3996-s EDN: QOZFUN

4. Grossi M., Alfonsi F., Prandini M., Gabrielli A. A High Throughput Intrusion Detection System (IDS) to Enhance the Security of Data Transmission Among Research Centers

// Journal of Instrumentation. – 2023. – Vol. 18, №12. – C12017 p. DOI: 10.1088/1748-0221/18/12/c12017 EDN: HPFGMP

5. Kheddar H., Himeur Y., Awad A. I. Deep Transfer Learning for Intrusion Detection in Industrial Control Networks: A Comprehensive Review // Journal of Network and Computer Applications. – 2023. – Vol. 220. – 103760 p. DOI: 10.1016/j.jnca.2023.103760 EDN: ISHBXU

6. Security-as-a-Function for IDS/IPS in Softwarized Network and Applications to 5G Network Systems [Электронный ресурс] // arXiv. – URL: https://arxiv.org/abs/2508.13581 (дата обращения: 10.07.26).

7. Cisco Smart Install Remote Code Execution [Электронный ресурс] // Embedi. – URL: https://web.archive.org/web/2018/https://embedi.com/blog/cisco-smart-install-remote-code-execution/ (дата обращения: 10.07.26).

8. Cisco IOS and IOS XE Software Smart Install Remote Code Execution Vulnerability [Электронный ресурс] // Cisco. – URL: https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/csa/cisco-sa-20180328-smi2.html (дата обращения: 10.07.26).

9. A Decade of Espionage: How a Russian APT Exploited Cisco Devices (CVE-2018-0171) for Years [Электронный ресурс] // Daily CyberSecurity. – URL: https://securityonline.info/a-decade-of-espionage-how-a-russian-apt-exploited-cisco-devices-cve-2018-0171-for-years/ (дата обращения: 10.07.26).

10. Static Tundra Analysis & CVE-2018-0171 Detection Guide [Электронный ресурс] // Splunk. – URL: https://embargo.splunk.com/en_us/blog/security/cve-2018-0171-static-tundra-smart-install-detection-guide.html (дата обращения: 10.07.26).

11. Cisco Smart Install (SMI) Remote Code Execution – What You Need to Know [Электронный ресурс] // Rapid7. – URL: https://www.rapid7.com/blog/post/2018/03/29/cisco-smart-install-smi-remote-code-execution-what-you-need-to-know/ (дата обращения: 10.07.26).

12. National Vulnerability Database. CVE-2018-0171 Detail [Электронный ресурс] / NIST. – URL: https://nvd.nist.gov/vuln/detail/CVE-2018-0171 (дата обращения: 10.07.26).

13. Known Exploited Vulnerabilities Catalog [Электронный ресурс] // CISA. – URL: https://www.cisa.gov/known-exploited-vulnerabilities-catalog (дата обращения: 10.07.26).

14. Exploit Public-Facing Application [Электронный ресурс] // MITRE ATT&CK. – URL: https://attack.mitre.org/techniques/T1190/ (дата обращения: 10.07.26).

15. CWE-787: Out-of-bounds Write [Электронный ресурс] // CWE. – URL: https://cwe.mitre.org/data/definitions/787.html (дата обращения: 10.07.26).

16. ГОСТ Р 56939-2016. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2016. – 18 с.

17. ГОСТ 34.003-90. Межгосударственный стандарт. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1991.

18. Методический документ от 5 февраля 2021 г. [Электронный ресурс] // ФСТЭК России. – URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskie-dokumenty (дата обращения: 10.07.26).

19. NIST SP 800-61 Rev. 2. Computer Security Incident Handling Guide [Электронный ресурс] // NIST. – URL: https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/61/r2/final (дата обращения: 10.07.26).

УДК 004.056.53

Брагина Е. А., Рунова В. В.
Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, Россия

ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ КОНФИГУРАЦИИ ОС АЛЬТ ТРЕБОВАНИЯМ CIS BENCHMARKS СРЕДСТВАМИ LYNIS: МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ АУДИТА И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗАЩИЩЁННОСТИ

Аннотация. В статье предложена и апробирована методика оценки соответствия конфигурации отечественной операционной системы Альт требованиям CIS Benchmarks с использованием инструмента автоматизированного аудита Lynis и авторского механизма обработки результатов. Поскольку официальный CIS Benchmark и адаптированные SCAP-профили для ОС Альт отсутствуют, в качестве эталонной модели принят документ CIS Red Hat Enterprise Linux 8 Benchmark v4.0.0, требования которого адаптированы к особенностям дистрибутива и сопоставлены с проверками Lynis. Введена дискретная модель оценки с пятью статусами проверок, а также базовый и взвешенный (с учётом критичности разделов) показатели соответствия. Разработан скрипт автоматизированной обработки отчёта Lynis, реализующий двухуровневую модель оценки. Апробация выполнена на реальной установке Альт Рабочая Станция 11.1 методом повторного аудита: первичный показатель соответствия 51,28 % после поэтапной настройки сетевой подсистемы и системных сервисов повышен до 71,79 %. Проведён сравнительный анализ Lynis и OpenSCAP, рассмотрены границы применимости методики, ограничения исследования и направления дальнейшей работы.

Ключевые слова: CIS Benchmarks, Lynis, ОС Альт, аудит безопасности, конфигурационный аудит, показатель соответствия, hardening, OpenSCAP, sysctl, SSH, журналирование, ФСТЭК России, информационная безопасность.

1. Введение

В условиях роста числа киберугроз и усложнения инфраструктуры информационных систем обеспечение безопасности операционных систем становится одной из ключевых задач защиты информации [1]. Значительная доля инцидентов связана не с программными дефектами, а с небезопасной конфигурацией системного окружения: некорректными настройками служб, избыточными правами доступа и недостаточной защитой сетевых сервисов [4, 5]. Поэтому аудит конфигурации операционной системы рассматривается как самостоятельный и практически значимый элемент жизненного цикла информационной системы [3].

Особый интерес представляет применение стандартизированных подходов к аудиту отечественных операционных систем, поскольку вопросы

внедрения международных стандартов безопасности для них изучены недостаточно [2]. Операционная система Альт всё шире применяется в государственных информационных системах и на объектах критической информационной инфраструктуры, что повышает требования к контролю её защищённой настройки [2, 13].

Современные подходы к аудиту предполагают активное использование автоматизированных инструментов, снижающих влияние человеческого фактора и трудоёмкость анализа [6, 7]. Вопросы автоматизации проверки конфигураций и выявления небезопасных настроек рассматриваются в ряде работ: предложены подходы к автоматической реализации руководств по безопасной настройке [7], к выявлению правил, нарушающих работоспособность системы [8], и фреймворки автоматизированного анализа ошибок конфигурации Linux [16, 17]. Эти работы подтверждают, что автоматизированный конфигурационный аудит является основным инструментом первичной оценки защищённости Unix-подобных систем.

В качестве эталонной нормативной модели в работе используются CIS Benchmarks, разработанные Center for Internet Security, – систематизированный набор практико-ориентированных требований к безопасной настройке систем [4]. Применимость CIS-стандартов к аудиту Linux подтверждена, в частности, в [4]. При этом инструмент Lynis не реализует CIS Benchmarks напрямую: набор его проверок формируется разработчиками и лишь частично пересекается с требованиями стандарта [15], из-за чего результаты аудита требуют дополнительной интерпретации и сопоставления.

Объектом исследования является безопасность операционной системы Альт в контексте её конфигурации и настроек. Предметом исследования выступают методы и средства аудита безопасности на основе CIS Benchmarks и инструмента Lynis, а также подходы к автоматизации оценки соответствия системы требованиям безопасности.

В отличие от перечисленных работ, посвящённых общим механизмам безопасности Linux [5, 18] и автоматизации проверки конфигураций [7, 8, 16, 17], настоящее исследование сфокусировано на прикладной задаче – построении воспроизводимой методики оценки соответствия конфигурации ОС Альт требованиям CIS Benchmarks в условиях отсутствия официального Benchmark и SCAP-профиля для этой системы, с формализованной моделью расчёта показателя защищённости и автоматизированной обработкой результатов Lynis.

Цель работы – разработка и апробация методики оценки соответствия конфигурации ОС Альт требованиям CIS Benchmarks средствами Lynis с автоматизированной обработкой результатов аудита и анализом показателей защищённости.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- проанализировать теоретические основы аудита безопасности операционных систем и содержание CIS Benchmarks;
- изучить принципы работы и функциональные возможности инструмента Lynis и сопоставить его с альтернативным средством OpenSCAP;
- сопоставить требования CIS Benchmarks с реализуемыми проверками Lynis и адаптировать их к ОС Альт;
- разработать модель и критерии оценки соответствия системы требованиям безопасности;
- реализовать автоматизированный механизм обработки результатов аудита и апробировать методику методом повторного аудита;
- выполнить анализ показателей защищённости, определить ограничения исследования и направления дальнейшей работы.

2. Термины и определения

Терминология приведена в соответствие с национальными стандартами в области защиты информации [14] и методическими документами; понятия защищённости и мер защиты трактуются с учётом требований ФСТЭК России [13].

Аудит безопасности операционной системы – систематический процесс анализа конфигурации, параметров функционирования и механизмов защиты системы с целью выявления уязвимостей и оценки соответствия установленным требованиям безопасности.

CIS Benchmarks – набор практико-ориентированных рекомендаций по безопасной настройке операционных систем, приложений и сетевых сервисов, разработанный Center for Internet Security и используемый как эталонная модель оценки конфигурации.

Безопасная конфигурация – состояние системы, при котором значения её параметров соответствуют требованиям выбранной нормативной базы и обеспечивают приемлемый уровень защищённости.

Профиль (Level 1 / Level 2) – уровень строгости требований CIS Benchmarks: Level 1 объединяет базовые меры без существенного влияния на работоспособность, Level 2 расширяет Level 1 более строгими мерами для сред с повышенными требованиями к безопасности.

Показатель соответствия – количественная мера выполнения требований выбранной нормативной базы, рассчитываемая как доля успешно пройденных проверок с учётом степени их сопоставимости и критичности.

Усиление защищённости (hardening) – комплекс действий по приведению конфигурации системы к безопасным значениям с целью сокращения поверхности атаки.

3. Постановка задачи и модель оценки соответствия

Поскольку Lynis не является строгим инструментом проверки соответствия конкретному стандарту, методика опирается не на готовый вердикт инструмента, а на формализованное сопоставление его проверок с требованиями CIS Benchmarks и на расчёт интегрального показателя защищённости. Для каждой проверяемой рекомендации CIS вводится один из пяти статусов: соответствует (требование выполнено в полном объёме); не соответствует (не выполнено); частично соответствует (выполнено не полностью либо требует донастройки); не применимо (не относится к исследуемой системе); требует ручной проверки (автоматическая оценка невозможна).

Введение категории «не применимо» обусловлено адаптацией CIS Benchmark к ОС Альт: исключение таких требований из расчёта предотвращает искажение итоговой оценки. Категория «требует ручной проверки» используется для рекомендаций, которые не могут быть полностью формализованы средствами Lynis.

Базовая модель оценки задаёт показатель соответствия в виде:

$$S = (N_{ok} + \alpha \cdot N_{part}) / (N_{total} - N_{na}) \quad (1)$$

где N_{ok} – количество полностью соответствующих требований; N_{part} – частично выполненных; N_{na} – неприменимых; N_{total} – общее число требований; α – коэффициент частичного соответствия ($\alpha = 0,5$).

Для учёта различного влияния требований на защищённость вводится оценка критичности (severity/impact). Высокий уровень (High) присваивается требованиям, влияющим на аутентификацию, контроль доступа, сетевую безопасность и журналирование; средний (Medium) – конфигурации сервисов и системных компонентов; низкий (Low) – дополнительным рекомендациям. Соответствующие коэффициенты значимости: High – 1,0; Medium – 0,7; Low – 0,4. Взвешенный показатель соответствия:

$$S = \Sigma (p_i \cdot w_i \cdot m_i) / \Sigma (w_i \cdot m_i) \quad (2)$$

где p_i – результат проверки требования (1 при прохождении, 0 при невыполнении); w_i – коэффициент критичности; m_i – степень соответствия проверки Lynis требованию CIS (1 при полном, 0,5 при частичном).

Базовая модель применяется для прямого сравнения первичного и повторных аудитов, взвешенная – для уточнённой интерпретации с учётом того, что отклонения в разных разделах CIS Benchmark неодинаково влияют на защищённость. Показатель рассчитывается как по всей совокупности требований, так и отдельно по каждому функциональному разделу.

4. Объект и средства аудита

4.1 Структура и профили CIS Benchmarks

CIS Benchmarks представляют собой рекомендации, сгруппированные по категориям: управление доступом, конфигурация сетевых сервисов, защита

учётных записей, аудит событий безопасности и др. Каждая рекомендация включает описание проверяемого параметра, обоснование, метод проверки и способ устранения несоответствия. Требования разделены на автоматизированные (Automated) – с однозначным результатом – и ручные (Manual), требующие экспертного анализа, а также на профили Level 1 и Level 2, где Level 2 расширяет Level 1.

В работе в качестве эталона принят документ CIS Red Hat Enterprise Linux 8 Benchmark v4.0.0 – одно из наиболее полных и структурированных руководств для корпоративных Linux-систем. Его выбор обусловлен отсутствием специализированного CIS Benchmark для ОС Альт и близостью архитектурных характеристик. Документ объединяет семь функциональных разделов: Initial Setup (Filesystem), Services, Network, Host Based Firewall, Access Control, Logging and Auditing и System Maintenance.

4.2 Инструмент автоматизированного аудита Lynis

Lynis – утилита с открытым исходным кодом для аудита безопасности Unix-подобных систем [15]. Принцип её работы основан на последовательном выполнении набора тестов, охватывающих параметры ядра, настройки служб, механизмы аутентификации и конфигурацию сетевых компонентов [17]. Результаты включают предупреждения (warnings), рекомендации (suggestions) и обобщённую оценку защищённости (hardening index). Инструмент может запускаться в пакетном режиме и интегрироваться в регулярные сценарии аудита [18], формируя два основных файла:

/var/log/lynis.log – подробный журнал выполнения проверок;

/var/log/lynis-report.dat – структурированный отчёт для автоматизированной обработки.

Поскольку набор проверок Lynis лишь частично пересекается с требованиями нормативных документов, использование инструмента в отрыве от формализованных критериев не позволяет получить однозначный вывод о соответствии системы стандарту [15]. Это обусловливает необходимость сопоставления и расчёта показателя соответствия.

4.3 Сравнительный анализ Lynis и OpenSCAP

Для обоснования выбора инструмента Lynis сопоставлен с OpenSCAP – средством проверки соответствия формализованным профилям в формате SCAP. Преимущество OpenSCAP – проверки на основе готовых профилей (CIS, DISA STIG), однако их применимость к ОС Альт ограничена ввиду отсутствия адаптированного профиля; при его отсутствии результаты могут быть неполными или методически некорректными. Lynis не реализует CIS напрямую, но обладает высокой переносимостью и не требует профиля для конкретного дистрибутива, что делает его удобным для первичного аудита ОС Альт. Сводное сравнение приведено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение Lynis и OpenSCAP как средств аудита безопасности

Критерий сравнения	Lynis	OpenSCAP
Основное назначение	Практический аудит и повышение безопасности Unix/Linux-систем	Проверка соответствия формализованным профилям безопасности
Подход к аудиту	Эвристический и конфигурационный анализ	Аудит соответствия на основе SCAP-профилей
Связь с CIS Benchmarks	Не реализует CIS напрямую, требует сопоставления	Может использовать CIS-профили при их наличии
Применимость к ОС Альт	Высокая: не требует отдельного профиля ОС	Ограниченная при отсутствии адаптированного профиля
Уровень формализации	Средний: результаты требуют интерпретации	Высокий: проверки связаны с конкретными требованиями
Автоматизация	Удобен в скриптах и регулярных проверках	Поддерживается, но требует подготовленной базы правил
Ограничения	Неполное покрытие CIS, ручное сопоставление	Зависимость от профилей и их совместимости с ОС

Выбор Lynis обусловлен не превосходством над OpenSCAP, а большей практической применимостью к ОС Альт в условиях отсутствия официального CIS Benchmark и SCAP-профилей. OpenSCAP рассматривается как перспективное направление расширения работы при появлении соответствующих профилей.

5. Методика аудита и автоматизированной обработки результатов

5.1 Адаптация требований CIS Benchmark к ОС Альт

Прямой перенос требований CIS RHEL 8 Benchmark к ОС Альт методически некорректен: в документе указано, что каждый Benchmark разрабатывается для конкретного продукта и версии, а его положения носят рекомендательный характер. Поэтому требования адаптируются – отбираются, интерпретируются и группируются с учётом различий в пакетах, конфигурационных файлах, механизмах управления службами и доступных средствах защиты.

Адаптация выполнена в несколько этапов. Сначала из структуры Benchmark выделяются разделы универсального характера. Затем рекомендации разделяются по применимости на три группы: применимые без существенных изменений; применимые частично и требующие интерпретации; неприменимые либо требующие изменений, при которых их использование в исходном виде необоснованно (последние исключаются из расчёта). Далее учитывается способ проверки (Automated/Manual), что позволяет заранее выделить требования, пригодные для автоматизированной оценки. За базовую основу принят профиль Level 1; отдельные рекомендации

Level 2 включаются дополнительно при технической реализуемости и отсутствии критического влияния на функциональность.

5.2 Сопоставление требований CIS с проверками Lynis

Для каждой рекомендации зафиксированы её содержание, применимость к ОС Альт, степень адаптации, тип проверки и возможность проверки средствами Lynis. Сопоставление выполнено по всем семи разделам Benchmark. В качестве репрезентативного примера в таблице 2 приведён фрагмент раздела Network, демонстрирующий высокую применимость требований к ОС Альт и хорошее покрытие проверками Lynis.

Таблица 2. Фрагмент сопоставления требований CIS Network с проверками Lynis

CIS ID	Краткое требование	Применимость	Проверка Lynis
3.3.2	Запретить отправку ICMP redirects	Высокая	Да
3.3.3	Запретить принятие ICMP redirects	Высокая	Да
3.3.5	Логирование подозрительных пакетов (martians)	Высокая	Да
3.3.6	Защита от spoofing (rp_filter)	Высокая	Да
3.3.7	Запрет source routed packets	Высокая	Да
3.3.8	Включить TCP SYN cookies	Высокая	Да
3.2.1	Отключить модуль dccp	Высокая	Нет
3.1.1	Отключить IPv6 при отсутствии необходимости	Средняя	Нет

Анализ показал, что Lynis не реализует проверку отдельных модулей файловых систем и сетевых протоколов поимённо, используя обобщённые механизмы анализа загруженных модулей и параметров ядра. Это приводит к частичному покрытию ряда требований и предполагает дополнительные ручные проверки. Для снижения вероятности ошибок сопоставления выполнена выборочная ручная верификация части критериев системными утилитами Linux (sysctl, grep, systemctl, mount, iptables); результаты сведены в таблице 3.

Таблица 3. Верификация сопоставления показателей CIS и Lynis

Требование CIS	Тест Lynis	Способ ручной проверки	Совпадение
net.ipv4.conf.all.accept_redirects	KRNL-6000	sysctl net.ipv4.conf.all.accept_redirects	Полное
net.ipv4.conf.all.rp_filter	KRNL-6000	sysctl net.ipv4.conf.all.rp_filter	Полное
PermitRootLogin	SSH-7408	grep PermitRootLogin sshd_config	Полное
MaxAuthTries	SSH-7408	grep MaxAuthTries sshd_config	Частичное
xinetd	INSE-8000	systemctl status xinetd	Полное
firewall	FIRE-4512	iptables -L	Частичное
/tmp mount options	FILE-6310	mount | grep /tmp	Частичное
auditd	ACCT-9628	systemctl status auditd	Частичное

Верификация показала, что для параметров ядра, сетевой подсистемы и состояния сервисов Lynis обеспечивает высокую точность, тогда как для требований аутентификации, политик PAM, журналирования и аудита он даёт лишь косвенную или частичную оценку. Возможны два типа отклонений: ложноположительные (фиксируется наличие механизма без проверки полноты его настройки) и ложноотрицательные (безопасная конфигурация реализована нестандартно и не распознаётся). Поэтому методика ориентирована на практический конфигурационный аудит, а не на строгую сертификацию соответствия CIS Benchmark.

5.3 Скрипт автоматизированной обработки результатов

Сопоставление показало, что автоматизированный аудит не покрывает полностью все критерии стандарта: часть проверок реализуется частично, ряд требований в отчётах Lynis отсутствует. Для автоматизации обработки разработан скрипт (язык Python), который фильтрует результаты Lynis по таблицам сопоставления, классифицирует проверки, агрегирует их по разделам и рассчитывает показатели соответствия. В его основе – двухуровневая модель оценки.

На первом уровне каждому критерию CIS задаётся степень соответствия проверке Lynis: полное (вес 1), частичное (вес 0,5) либо отсутствие подходящей проверки (вес 0, критерий помечается как нереализованный). На втором уровне анализируется результат проверки: статус извлекается из

текстового вывода и интерпретируется по смыслу критерия – для одних требований безопасным является статус «ОК», для запрещённых компонентов безопасным, напротив, считается «НЕ НАЙДЕНО». Итоговая оценка критерия – произведение веса сопоставления на бинарный результат проверки. Иллюстративный фрагмент логики нормализации статусов и расчёта приведён ниже.

SAFE_STATUSES = {"СООТВЕТСТВУЕТ", "ОТКЛЮЧЕНО", "НЕ ОБНАРУЖЕНО", "ЗАЩИЩЕНО"}

UNSAFE_STATUSES = {"НЕ СООТВЕТСТВУЕТ", "УЯЗВИМО", "НЕБЕЗОПАСНО", "ОБНАРУЖЕНО"}

```
def audit_pass(status, pass_mode):
 if pass_mode == "safe": # требование: компонент настроен
 return 1 if status in SAFE_STATUSES else 0
 if pass_mode == "absent": # требование: запрещённый сервис отсутствует
 return 1 if status in SAFE_STATUSES else 0
 return 0

# итоговый балл критерия: вес сопоставления * результат проверки
final_score = mapping_weight * audit_pass(status, pass_mode)
```

Скрипт последовательно обрабатывает все критерии, сгруппированные по семи разделам CIS Benchmark, и рассчитывает суммарные показатели как по каждому разделу, так и по системе в целом. Результатом являются структурированные отчёты (JSON и текстовый) с найденными проверками, их статусами, баллами и итоговым процентом соответствия.

6. Апробация методики и результаты

6.1 Лабораторный стенд и первичный аудит

Апробация выполнена на реальной установке операционной системы Альт Рабочая Станция версии 11.1. Для аудита использован инструмент Lynis версии 3.0.9, запуск выполнен штатной командой комплексного аудита системы:

```
lynis audit system
```

Выполнение команды инициирует комплексную проверку файловой системы, сетевых настроек, служб и механизмов аутентификации; результаты выводятся в консоль и сохраняются в отчётные файлы. Для дальнейшей обработки использован структурированный отчёт /var/log/lynis-report.dat. По результатам первичного аудита получены показатели, приведённые в таблице 4.

Таблица 4. Результаты первичного аудита

Показатель	Значение
Рассмотрено критериев	73
Реализовано через проверки Lynis	71
Без автоматизированного покрытия	2
Максимально возможный балл	58,5
Фактически набранный балл	30,0
Итоговый показатель соответствия	51,28 %

Наихудшие результаты при первичной проверке показали разделы, связанные с сетевой подсистемой и составом системных сервисов, что определило порядок последующей настройки.

6.2 Поэтапное устранение несоответствий и контрольные аудиты

Усиление защищённости выполнено по принципу единственного изменяемого фактора: после каждого этапа настройки производился повторный запуск Lynis и пересчёт показателей. Первым этапом выбрана сетевая подсистема (раздел Network) как содержащая отклонения параметров ядра, отвечающих за обработку сетевого трафика. Приведение параметров sysctl к безопасным значениям выполнено, в частности, следующими настройками:

net.ipv4.conf.all.accept_redirects = 0
net.ipv4.conf.all.secure_redirects = 0
net.ipv4.conf.all.send_redirects = 0
net.ipv4.conf.all.rp_filter = 1
net.ipv4.conf.all.accept_source_route = 0
net.ipv4.tcp_syncookies = 1
net.ipv4.conf.all.log_martians = 1

После повторного аудита соответствие в разделе Network возросло с 54,55 % до 90,91 %: количество полностью пройденных проверок увеличилось с 6 до 10, а число непройденных сократилось с 5 до 1. Общий показатель соответствия системы при этом вырос с 51,28 % до 58,12 % (прирост 6,84 процентных пункта).

Вторым этапом устранены несоответствия в разделе Services, показавшем наихудший первичный результат (28,57 %): отключены и удалены небезопасные и устаревшие сервисы, минимизировано число активных компонентов, не требуемых для функционирования системы. По итогам повторного аудита соответствие в разделе Services возросло с 28,57 % до 85,71 %, набранный балл – с 4,0 до 12,0 из 14,0; количество пройденных проверок увеличилось с 4 до 12, непройденных – сократилось с 11 до 3. Изменения существенно повлияли и на общий показатель: итоговое соответствие системы

достигло 71,79 % при суммарном балле 42,0 из 58,5. Динамика показателей приведена в таблице 5.

Таблица 5. Динамика показателей соответствия по этапам аудита

Этап	Network	Services	Система, всего
Первичный аудит	54,55 %	28,57 %	51,28 %
После настройки Network	90,91 %	28,57 %	58,12 %
После настройки Services	90,91 %	85,71 %	71,79 %

7. Анализ и обсуждение результатов

7.1 Сравнение базовой и взвешенной моделей оценки

Для уточнённой интерпретации применена взвешенная модель, учитывающая критичность разделов. Высокий уровень критичности (коэффициент 1,0) присвоен разделам Network, Host Based Firewall, Access Control и Logging and Auditing, напрямую связанным с сетевой безопасностью, управлением доступом и контролем событий; средний (коэффициент 0,7) – разделам Filesystem, Services и System Maintenance, преимущественно отражающим конфигурацию системы и состав служб. Результаты сравнения базовой и взвешенной моделей по итоговому состоянию системы приведены в таблице 6.

Таблица 6. Сравнение базовой и взвешенной моделей оценки

Раздел	Балл	Макс.	Критич.	Коэф.	Взв. балл	Взв. макс.
Filesystem	2,5	5,5	Medium	0,7	1,75	3,85
Services	12,0	14,0	Medium	0,7	8,40	9,80
Network	10,0	11,0	High	1,0	10,00	11,00
Host Based Firewall	2,0	2,0	High	1,0	2,00	2,00
Access Control	6,5	11,5	High	1,0	6,50	11,50
Logging and Auditing	2,5	7,0	High	1,0	2,50	7,00
System Maintenance	6,5	7,5	Medium	0,7	4,55	5,25
Итого	42,0	58,5	–	–	36,20	50,40

Взвешенная оценка (36,20 из 50,40, около 71,8 %) близка к базовой, однако перераспределяет вклад разделов: пониженные показатели высококритичных разделов Access Control и Logging and Auditing оказывают на неё более выраженное влияние, что точнее отражает реальные риски компрометации.

7.2 Интерпретация и границы применимости методики

Несмотря на существенный рост итогового показателя после настройки разделов Network и Services, дальнейшее повышение защищённости оказалось ограничено. Последующие разделы CIS Benchmark требуют значительно более глубокой модификации механизмов безопасности: разделы Access Control и Logging and Auditing затрагивают параметры аутентификации, политики PAM, настройку auditd и централизованное журналирование. Кроме того, часть их требований не имеет полного автоматизированного покрытия средствами Lynis – инструмент фиксирует лишь наличие или отсутствие отдельных компонентов, не выполняя полноценную проверку конфигурации, вследствие чего отдельные критерии требуют ручной экспертной проверки.

Таким образом, достигнутый показатель 71,79 % отражает не максимально возможный уровень защищённости системы, а границу применимости реализованной методики при выбранном наборе инструментов и ограничениях исследования. Причина «остановки» показателя – сочетание неполного покрытия требований CIS Benchmark средствами Lynis и ограниченности автоматизированного подхода в отношении сложных параметров безопасности, требующих ручной верификации, экспертной интерпретации либо глубокой модификации конфигурации, способной повлиять на стабильность эксплуатации.

7.3 Соотнесение с нормативной базой

Использование CIS Benchmarks не заменяет выполнение требований ФСТЭК России и национальных стандартов, а служит инструментальной основой для технической детализации отдельных мер защиты на уровне конфигурации операционной системы [13, 14]. Приказы ФСТЭК России и стандарты определяют обязательные или рекомендуемые меры и процессы управления безопасностью, тогда как CIS Benchmarks задают конкретные безопасные значения системных параметров. Поэтому предложенная методика рассматривается как практический инструмент первичной оценки и повышения защищённости, дополняющий нормативные требования, но не подменяющий процедуры аттестации.

8. Практические рекомендации по повышению защищённости

8.1 Устранение конфигурационных несоответствий

Первоочередными являются меры с высоким покрытием и низким риском нарушения работоспособности: приведение параметров ядра (sysctl) к безопасным значениям в разделе Network и отключение неиспользуемых и устаревших сервисов в разделе Services. Эффективность обеих мер подтверждена экспериментально (рост соответствия по разделам до 90,91 % и 85,71 % соответственно).

8.2 Усиление контроля доступа и журналирования

Для разделов Access Control и Logging and Auditing рекомендуется углублённая настройка с обязательной ручной верификацией: ограничение

root-доступа и параметров SSH-сервера (PermitRootLogin, MaxAuthTries, безопасные алгоритмы), настройка политик PAM (faillock, pwquality, pwhistory), а также установка и конфигурирование auditd с заданием правил аудита и централизованной передачей журналов. Эти меры дают наибольший вклад в защищённость, но требуют экспертного контроля влияния на эксплуатацию [18].

8.3 Регулярный автоматизированный аудит

Целесообразно встроить аудит в регулярные процессы: запуск Lynis по расписанию (планировщик задач) и в составе конвейеров сопровождения, автоматическая обработка отчётов разработанным скриптом и отслеживание динамики показателя соответствия между проверками. Такой подход обеспечивает контроль изменений конфигурации и своевременное выявление регрессий безопасности [6, 16].

8.4 Сравнительный анализ мер

Сводная оценка рекомендуемых мер по полноте покрытия требований, риску нарушения работоспособности и трудозатратам приведена в таблице 7.

Таблица 7. Сравнительный анализ мер повышения защищённости ОС Альт

Мера	Полнота покрытия	Риск нарушения работы	Трудозатраты
Настройка sysctl (Network)	Высокая (раздел Network)	Низкий	Низкие
Отключение устаревших сервисов	Высокая (раздел Services)	Низкий–средний	Низкие
Настройка SSH/PAM/sudo	Высокая (Access Control)	Средний	Средние–высокие
Настройка auditd и журналирования	Высокая (Logging)	Низкий	Высокие
Регулярный аудит Lynis + скрипт	Не устраняет, обеспечивает контроль	Отсутствует	Средние

Максимальный уровень защищённости достигается сочетанием конфигурационного усиления высококритичных разделов с регулярным автоматизированным аудитом; настройка sysctl и отключение сервисов обеспечивают наилучшее соотношение полноты покрытия и трудозатрат, тогда как меры Access Control и Logging требуют большего экспертного участия.

9. Ограничения исследования

- Апробация выполнена на единственном дистрибутиве и версии (Альт Рабочая Станция 11.1); для повышения внешней валидности необходима проверка на иных версиях и редакциях ОС Альт.
- В качестве эталона использован адаптированный CIS Red Hat Enterprise Linux 8 Benchmark при отсутствии официального CIS Benchmark и SCAP-профиля для ОС Альт, что требует интерпретации части требований.
- Сопоставление требований CIS с проверками Lynis выполнено экспертным способом; возможны ложноположительные и ложноотрицательные отклонения.
- Ряд требований (Access Control, Logging and Auditing) не имеет полного автоматизированного покрытия и требует ручной верификации; глубокая настройка этих разделов в рамках работы не выполнялась.
- Достигнутый показатель 71,79 % отражает границу применимости методики при выбранном инструментарии, а не предельно достижимый уровень защищённости системы.

10. Заключение

Разработана и апробирована методика оценки соответствия конфигурации ОС Альт требованиям CIS Benchmarks средствами Lynis с автоматизированной обработкой результатов аудита. Рассмотрены теоретические основы аудита и структура CIS Benchmarks, изучены возможности и ограничения Lynis, проведено его сравнение с OpenSCAP, обосновавшее выбор Lynis для условий отсутствия адаптированного профиля ОС Альт.

Выполнено сопоставление требований CIS Benchmarks с проверками Lynis по семи функциональным разделам и их адаптация к ОС Альт; часть критериев соотнесена напрямую или частично, часть осталась нереализованной средствами инструмента. Предложены дискретная модель статусов проверок, а также базовый и взвешенный показатели соответствия с учётом критичности разделов. Реализован скрипт автоматизированной обработки отчёта Lynis с двухуровневой моделью оценки.

Экспериментальная проверка методом повторного аудита на реальной установке Альт Рабочая Станция 11.1 показала рост итогового показателя соответствия с 51,28 % до 71,79 %: соответствие раздела Network повышено до 90,91 %, раздела Services – до 85,71 %. Установлено, что дальнейшее повышение показателя ограничено неполным автоматизированным покрытием высококритичных разделов Access Control и Logging and Auditing, требующих ручной верификации и глубокой настройки.

Практическая значимость работы состоит в применимости предложенной методики и инструментария для первичной оценки и повышения защищённости конфигурации ОС Альт в учебных лабораториях и

корпоративных средах. Перспективные направления – верификация на дополнительных версиях ОС Альт, расширение покрытия требований Access Control и Logging and Auditing с ручной верификацией, а также интеграция с OpenSCAP при появлении адаптированных SCAP-профилей.

Список литературы:

1. Гарькушев А.Ю., Липис А.В., Карпова И.Л. Основы обеспечения безопасности операционных систем: учебное пособие. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 124 с. EDN: ZOBGUG
2. Павловский В. В. Применение мер защиты информации в операционных системах Альт // Международная научно-техническая конференция молодых учёных БГТУ им. В.Г. Шухова. Ч. 13. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 364–367. EDN: UPISWZ
3. Скабцов Н. Kali Linux в действии. Аудит безопасности информационных систем. – СПб.: Питер, 2026. – 384 с.
4. Sedano W. K., Salman M. Auditing Linux Operating System with Center for Internet Security (CIS) Standard // International Conference on Information Technology (ICIT). – 2021. – P. 466–471. DOI: 10.1109/ICIT52682.2021.9491663
5. Лиманова Н. И., Анашкин А. С. Основные механизмы безопасности в Linux // Бюллетень науки и практики. – 2024. – Т.10, № 2. DOI: 10.33619/2414-2948/99/39 EDN: OLISNO
6. Zeng L., Xiao Y., Chen H. Linux Auditing: Overhead and Adaptation // IEEE International Conference on Communications (ICC). – 2015. – P. 7168–7173. DOI: 10.1109/ICC.2015.7249470
7. Automated Implementation of Security Configuration Guides for Operating Systems [Электронный ресурс] // arXiv preprint arXiv:2209.08936. – URL: https://arxiv.org/abs/2209.08936 (дата обращения: 08.05.2026).
8. Better Safe Than Sorry! Automated Identification of Functionality-Breaking Security-Configuration Rules [Электронный ресурс] // arXiv preprint arXiv:2303.05901. – URL: https://arxiv.org/abs/2303.05901 (дата обращения: 08.05.2026).
9. Ершова Т. В., Цветков А. Ю. Выбор метода проведения аудита информационной безопасности // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023). – 2023. – С. 480–483. EDN: YMFXWI
10. Calder A., Watkins S. IT Governance: An International Guide to Data Security and ISO 27001/ISO 27002 // IT Governance Publishing. – 2024. – 486 p. DOI: 10.2307/j.ctv336p2z9
11. Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2006. – № 31. – Ст. 3448.
12. Даньшина А. А., Бабенко А. А. Аудит средств безопасности ИСПДн // НБИ Технологии. – 2024. – Т.18, № 1. – С. 27-32. DOI: 10.15688/NBIT.jvolsu.2024.1.4 EDN: PPHJYE
13. Приказ ФСТЭК России от 25 декабря 2017 г. № 239 «Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» // ФСТЭК России.
14. ГОСТ Р 57580.1-2017. Безопасность финансовых (банковских) операций. Защита информации финансовых организаций. Базовый состав организационных и технических мер. – Стандартинформ, 2017. – 66 с.

15. Lynis Documentation [Электронный ресурс] // Cisofy auditing-hardening-compliance. – URL: https://cisofy.com/documentation/lynis/ (дата обращения: 06.05.2026).

16. A Unified Compliance Aggregator Framework for Automated Multi-Tool Security Assessment of Linux Systems [Электронный ресурс] // arXiv preprint arXiv:2604.17256. – URL: https://arxiv.org/abs/2604.17256 (дата обращения: 08.05.2026).

17. Dewangan N. K. et al. Enhancing Linux Security: A Framework for Automated Misconfiguration Analysis // Computational Intelligence and Network Security: ICCINS 2025. – P. 367-379. DOI: 10.1007/978-3-032-09572-5_29

18. Романов М. А., Бадалин А. О., Рыбалка Д. В., Борисов В. В., Новикова Д. Д. Методы повышения безопасности при администрировании серверов Linux // Программные системы и вычислительные методы. – 2025. – № 4. – С. 143–157. DOI: 10.7256/2454-0714.2025.4.77322 EDN: UHRMPL

19. Уймин А. Г., Греков В. С. Обзор систем моделирования: анализ эффективности на примере чемпионата AtomSkills-2023 // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2023. – № 11(604). – С. 25–34. DOI: 10.33285/2782-604X-2023-11(604)-25-34 EDN: QYQRCO

УДК 004.8

Байрамуков А. М.
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ДУБЛЯЖА ВИДЕОКОНТЕНТА С СОХРАНЕНИЕМ ОРИГИНАЛЬНОГО ГОЛОСА

Аннотация. В статье представлен системный анализ оптимизации процесса дубляжа видео контента с использованием технологий искусственного интеллекта, позволяющих сохранить оригинальный голос актёра. Рассматриваются три открытые нейросетевые модели клонирования голоса: OmniVoice, XTTS-v2 и VoxCPM2. Исследование заключается в подаче на вход модели эталонной записи голоса длительностью 40 секунд, после чего модель синтезирует новый аудио файл по заданному тексту. Оценка производится по четырём критериям: естественность речи (MOS), идентичность голоса (косинусное сходство эмбеддингов), рассинхронизация (отклонение длительности синтезированной фразы от эталонной) и время обработки. Приведены результаты эксперимента в среде Google Colab, подтверждающие эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: системный анализ; AI-дубляж; клонирование голоса; OmniVoice; XTTS-v2; VoxCPM2; MOS; voice cloning.

Введение

Современная медиа индустрия характеризуется беспрецедентной глобализацией контента. Ежегодный объём создаваемого видео контента может исчисляться эксабайтами, а количество платформ для его распространения постоянно растёт. Фильмы, сериалы, образовательные платформы, корпоративные видео и пользовательский контент распространяются по всему миру, требуя локализации для максимизации аудитории. Традиционные подходы к дубляжу, основанные на ручном переводе, подборе актёров озвучивания, студийной записи и последующем сведении, сопряжены со значительными временными и финансовыми затратами. Помимо дороговизны, данный процесс сталкивается с трудностями при переводе на малораспространённые языки, где сложно найти профессиональных актёров озвучивания.

Развитие искусственного интеллекта и, в частности, глубокого обучения [2, 6], произвело революцию во многих областях, включая обработку естественного языка и синтез речи [3]. В контексте локализации контента ИИ предлагает инновационные решения, способные автоматизировать и оптимизировать процесс дубляжа. Особый интерес представляет возможность сохранить уникальные характеристики оригинального голоса актёра с

помощью технологий voice cloning [1]. Однако выбор и внедрение конкретной нейросетевой архитектуры для дубляжа представляют собой сложную многокритериальную задачу системного анализа. Инженер сталкивается с компромиссом между качеством синтеза, точностью передачи тембральной идентичности, стабильностью временных характеристик (для укладки в липсинг) и вычислительной сложностью. Легковесные модели работают быстро, но склонны к роботизированному звучанию и потере эмоциональности, тогда как тяжелые диффузионные модели требуют мощных GPU-кластеров, что делает их внедрение экономически нецелесообразным для потоковой обработки данных.

Цель исследования - проанализировать нейросетевые методы клонирования голоса для дубляжа видео контента, обеспечивающие высокую естественность синтеза, сохранение идентичности оригинального голоса и устойчивость к временным искажениям при параметризации эталонной записи. Исследование направлено на формализацию процесса дубляжа как условного стохастического отображения, разработку математического аппарата для учёта рассинхронизации (на основе отклонения длительности синтезированной фразы), интеграцию механизмов сравнения голосовых эмбеддингов для обеспечения глобальной идентичности тембра. В работе применяется методология системного анализа, позволяющая объективно сравнивать модели по нескольким критериям и выбирать наилучшую для конкретного сценария применения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе рассматриваются три современные модели, доступные в открытом доступе.

- **OmniVoice** (edwixx/k2-fsa): диффузионнаямодель с дискретным не авторегрессивным декодером, 0.6B параметров, поддерживает 600+ языков. Zero-shot клонирование по 3–10 секундам речи [10].
- **XTTS-v2** (coqui): архитектура Transformer + VQ-VAE, 17 языков, требует 6 секунд эталонного аудио [9].
- **VoxCPM2** (openbmb): диффузионная авторегрессионная модель без токенизатора, 2B параметров, частота дискретизации 48 кГц, zero-shot клонирование по 3 секундам [11].

Все модели загружались из репозиториев Hugging Face и запускались в режиме FP16.

Эксперимент проводился в среде **Google Colab** (бесплатный тариф):

Эталонная запись: 40 секунд чистой речи на русском языке. Запись имела частоту дискретизации 24 кГц, моно, SNR > 30 дБ.

Синтезируемый текст: Панграмма на английском языке: «*The quick brown fox jumps over the lazy dog. The quick brown fox jumps over the lazy dog. Repeat: Pack my box with five dozen liquor jugs*».

Каждая модель выполняла синтез указанной фразы, используя эталонную запись для извлечения голосового эмбеддинга. Для каждой модели проводилось 5 запусков, результаты усреднялись.

Оценка качества проводилась по следующим критериям:

1. **Естественность (MOS)** – средняя оценка экспертов по шкале от 1 до 5 (ITU-T P.800) [12]. В экспертизе участвовали 10 человек, не имевших предварительной информации о модели.
2. **Идентичность голоса** – косинусное сходство между векторами эмбеддингов (извлечёнными с помощью предобученной сети ERes2Net [8]) для эталонной записи и синтезированной фразы. Значение в диапазоне [0,1].
3. **Рассинхронизация** – абсолютное отклонение длительности синтезированной фразы от длительности оригинального произнесения (5.2 с), выраженное в миллисекундах. Рассчитывалось как |Tsynth−Tref||*T*synth−*T*ref|.
4. **Время обработки** – суммарное время (в секундах) от момента подачи эталонной записи до получения синтезированного аудиофайла (включает загрузку модели, извлечение эмбеддинга и генерацию).

Для выбора наилучшей модели в условиях кинопоказа использовался аддитивный критерий с экспертными весами:

$$J = 0.4 \cdot Q_{\text{MOS}} + 0.3 \cdot \text{Sim} - 0.2 \cdot \frac{\Delta T}{100} - 0.1 \cdot \frac{t_{\text{proc}}}{60},$$

где ΔT – рассинхронизация (мс), t_{proc} – время обработки (с). Веса отражают приоритет естественности и идентичности над скоростью и синхронизацией.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В таблице 1 приведены средние значения метрик для каждой модели (по 5 запускам).

Таблица 1. Результаты эксперимента

Модель	MOS (1–5)	Идентичность (Sim)	Рассинхронизация, мс	Время обработки, с	J
OmniVoice	4.1 ± 0.2	0.82 ± 0.03	48 ± 7	42 ± 5	0.71
XTTS-v2	3.6 ± 0.2	0.71 ± 0.04	62 ± 9	28 ± 4	0.57
VoxCPM2	4.3 ± 0.2	0.87 ± 0.02	41 ± 6	89 ± 8	0.73

- **VoxCPM2** показал наивысшую естественность (4.3) и идентичность (0.87), а также минимальную рассинхронизацию (41 мс). Однако время обработки почти втрое больше, чем у OmniVoice, из-за высокой вычислительной сложности (2B параметров, 48 кГц).
- **OmniVoice** обеспечивает хороший баланс: MOS 4.1, идентичность 0.82, время обработки 42 с (приемлемо для не потокового дубляжа). Поддержка 600+ языков делает его универсальным.

- **XTTS-v2** уступает по качеству, но требует минимального времени обработки (28 с) и потребляет всего 4 ГБ VRAM, что критически важно для слабых GPU.

Все запуски выполнялись в идентичных условиях Google Colab. Использовалась только одна эталонная запись (мужской голос, русский язык). Для валидации универсальности требуется расширить датасет разными дикторами и языками. Бесплатный тариф Colab не гарантирует постоянной производительности GPU; возможны колебания времени обработки. Синтезировался лишь один короткий текст; на более длинных фразах рассинхронизация может возрастать [1].

Заключение

Проведённые исследования демонстрируют, что интеграция диффузионных моделей (OmniVoice, VoxCPM2), трансформерных архитектур (XTTS-v2) и методов коррекции временных отклонений обеспечивает получение высококачественного синтеза речи, согласованного с оригинальным голосом диктора. Математическая формализация процессов (аддитивный критерий с весами, метрика косинусного сходства эмбеддингов), анализ рассинхронизации, оценка естественности по MOS и экспериментальные исследования подтверждают эффективность описанного подхода при работе с различными моделями клонирования голоса.

Таким образом, полученные результаты подтверждают принципиальную возможность автоматизации дубляжа с сохранением оригинального тембра, но требуют дальнейшей валидации на более разнообразных данных – с разными дикторами, языками и длительностями синтезируемых фраз. Кроме того, перспективными направлениями являются разработка методов динамической коррекции рассинхронизации для длинных диалогов, а также оптимизация диффузионных моделей (в частности, VoxCPM2) для сокращения времени инференса без потери качества, что позволит приблизить их к практическому применению в кинопроизводстве.

Но помимо технических аспектов, широкое внедрение систем клонирования голоса в индустрию дубляжа сталкивается с существенными правовыми барьерами. Голос человека является уникальной биометрической характеристикой, а для профессиональных актёров озвучивания - ещё и коммерчески значимым активом. Однако во многих юрисдикциях правовой статус голоса остаётся неопределённым, что порождает риски несанкционированного использования синтезированных копий. Ключевые проблемы включают необходимость получения явного согласия носителя голоса, обязательную маркировку синтетического контента для предотвращения введения зрителей в заблуждение, а также разницу в регуляторных подходах между странами - от жёсткого запрета без разрешения до либерального режима с добровольной сертификацией. Для промышленного

применения технологий voice cloning требуется не только техническая оптимизация, но и разработка прозрачных юридических механизмов: лицензионных соглашений, систем учёта прав и процедур посмертной защиты голоса. Игнорирование правового измерения может свести на нет все технические преимущества, поскольку судебные иски и репутационные потери способны сделать автоматизированный дубляж экономически нецелесообразным.

Список литературы:

1. Hovhannisyan O. Comparison of Voice Cloning Algorithms in Zero-shot and Few-shot Scenarios / O. Hovhannisyan, D. Sargsyan, A. Malajyan // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. – 2024. – Vol. 36, No. 4. – P. 7-16. DOI: 10.15514/ISPRAS-2024-36(4)-1 EDN: JRJIDU
2. Галушкин А. И. Нейронные сети: основы теории: монография / А. И. Галушкин. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2017. – 496 с.
3. Белов С. Д., Зрелова Д. П., Зрелов П. В., Кореньков В. В. Обзор методов автоматической обработки текстов на естественном языке // Системный анализ в науке и образовании. – 2020. –№ 3. – С. 9-22. DOI:10.37005/2071-9612-2020-3-8-22
4. Серрано Л. Грокаем машинное обучение / Л. Серрано. – СПб.: Питер, 2026. – 512 с.
5. Шумский С. А. Машинный интеллект. Очерки по теории машинного обучения и искусственного интеллекта / С. А. Шумский // Москва: РИОР, 2019. – 340 с. DOI: 10.29039/02011-1 EDN: PAUJBA
6. Хайкин С. Нейронные сети и обучение машин: пер. с англ. / С. Хайкин. – 3-е изд. – Москва: Вильямс, 2019. – 934 с.
7. Azzuni H., Singh S. Voice Cloning: Comprehensive Survey // arXiv preprint arXiv:2505.00579. – 2025.
8. Лагутина Н. С. Обзор моделей автоматической оценки сходства ответа учащегося с эталонным ответом / Н. С. Лагутина, К. В. Лагутина // Моделирование и анализ информационных систем. – 2025. – Т. 32, № 1. – С. 42-65. DOI: 10.18255/1818-1015-2025-1-42-65 EDN: QOCCOT
9. Coqui. XTTS-v2 [Электронный ресурс] // Hugging Face. – URL: https://huggingface.co/coqui/XTTS-v2 (дата обращения: 10.07.26).
10. Edwixx. OmniVoice [Электронный ресурс] // Hugging Face. – URL: https://huggingface.co/edwixx/OmniVoice (дата обращения: 10.07.26).
11. OpenBMB. VoxCPM2 [Электронный ресурс] // Hugging Face. – URL: https://huggingface.co/openbmb/VoxCPM2 (дата обращения: 10.07.26).
12. P.800: Methods for subjective determination of transmission quality [Электронный ресурс] // ITU. – https://www.itu.int/rec/T-REC-P.800-199608-I/en (дата обращения: 10.07.26).

УДК 004.056

Бельчиков М. Д., Абзалетдинов А. И.
Научный руководитель: Морозов И. М., преподаватель
Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, Россия

RIPV2-FLOOD КАК ГИБРИДНЫЙ ВЕКТОР АТАКИ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕЩЁННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛОСКОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ И ТАБЛИЦУ МАРШРУТИЗАЦИИ СЕТЕВЫХ ПЛАТФОРМ

Аннотация. В работе рассматривается, как сетевое оборудование от трёх разных производителей переносит атаку RIPv2-flood. Берём три устройства — Cisco Catalyst 2960, MikroTik CRS326 и Eltex ESR-15R — и проверяем, что с ними происходит, если на multicast-адрес 224.0.0.9 сыпать поддельные RIP-обновления. По матрице MITRE ATT&CK это техника T1499.002. Мы показали, что у этой атаки два эффекта сразу: загрузка CPU плоскости управления и внедрение фейковых маршрутов в таблицу маршрутизации (route injection). То есть удар бьёт по двум целям одновременно — отнести его только к T1499.002 уже не получится. Эксперимент в данном случае построен на Python-скрипте на Scapy, темп — около 18 пакетов в секунду, это меньше 0,1 Мбит/с. Для каждой платформы измеряли загрузку CPU, доступность управляющего интерфейса по ICMP и проверяли, появились ли поддельные маршруты. По всем замерам приведены среднее и стандартное отклонение. В конце ранжируем устройства по устойчивости control plane.

Ключевые слова: RIP; RIPv2; MITRE ATT&CK; T1499.002; Service Exhaustion; flood-атака; route injection; control plane; сетевая безопасность.

Введение

Маршрутизация — одна из базовых служб сети. От того, какая информация лежит в таблице маршрутов, напрямую зависит, дойдёт пакет до адресата или уйдёт куда-то не туда. На сегодняшний день в корпоративных сетях используют, как правило, OSPF, IS-IS или EIGRP. Но RIP никуда не делся: его до сих пор включают в небольших корпоративных сегментах, на учебных стендах и в типовых лабах. Главная проблема — RIP по умолчанию работает без аутентификации, и обновления рассылаются по multicast. Этого достаточно для того, чтобы из RIP сделать удобный вектор атаки: то есть можно одновременно грузить CPU устройства и подсовывать ему фейковые маршруты.

Тема актуальна по двум причинам. Во-первых, ФСТЭК России в методическом документе «Методика оценки угроз безопасности информации» [7] требует строить модели угроз для сетевой инфраструктуры. Во-вторых, в матрице MITRE ATT&CK эта атака уже вынесена в отдельную технику —

T1499.002 (Endpoint Denial of Service: Service Exhaustion Flood) [4], и она применима именно к сетевому железу.

При этом в открытых источниках мы не нашли работы, где Cisco, MikroTik и Eltex проверили бы на устойчивость к RIP-flood в одних и тех же условиях, с замерами доступности управляющего интерфейса и проверкой, удалось ли подкинуть маршрут. Часть инцидентов с control plane на одноядерных коробках случается не из-за того, что защита не настроена. На самом деле их вызывает сама архитектура обработки протокольных пакетов — и тот факт, что сгенерировать валидный RIP-пакет атакующему стоит почти ничего [3, 8].

Объект исследования — плоскость управления (control plane) сетевого оборудования, которая обрабатывает сообщения RIPv2. Предмет — как именно деградирует control plane под нагрузкой RIP-flood и что параллельно происходит с таблицей маршрутизации.

Дальше в статье разбираем: как три платформы с разной CPU-архитектурой реагируют на одну и ту же атаку, какие сценарии гибридного воздействия мы наблюдаем (нагрузка + route injection), а также, какие цифры получаются по CPU и доступности (среднее ± SD, n повторов указано везде) и что в итоге можно сделать со стороны защиты.

Стенд изолированный, без выхода во внешнюю сеть. Три исследуемых устройства плюс атакующий узел на Ubuntu Linux. Все включены в один L2-сегмент 192.168.1.0/24. На каждом устройстве включён RIPv2 без аутентификации — это типовой случай. Подробности указаны в таблице 1.

Таблица 1 — Конфигурация лабораторного стенда

Параметр	**Значение**
Cisco Catalyst 2960	IOS 15.0(2)SE9, LAN Base, одноядерный CPU PowerPC 405EX
MikroTik CRS326-24G-2S+RM	RouterOS 7.22, ARM 32-bit, свитч-чип Marvell Prestera
Eltex ESR-15R	Eltex OS 1.24.5, четырёхъядерный ARM, разделение управляющего и пакетного ядер
Атакующий узел	Ubuntu Linux 24.04 LTS, Scapy 2.7.0
Топология	Изолированный L2-сегмент 192.168.1.0/24
Управляющий IP	192.168.1.1 (исследуемое устройство)
Конфигурация RIP	RIPv2, автоматическое объявление сети 192.168.1.0/24 без аутентификации

На атакующем узле используется Python-скрипт rip_flood.py на библиотеке Scapy 2.7.0+. Скрипт собирает валидные RIP v2 Response

сообщения и шлёт их в multicast 224.0.0.9 через sendp (то есть на уровне L2). В каждом пакете лежит 20 RIPEntry с фейковыми префиксами вида 10.X.Y.0/24, X и Y меняются от пакета к пакету. На контрольном прогоне длиной 11,63 секунды скрипт отправил 209 пакетов с суммой 4180 RIPEntry. Средняя скорость — 18,0 ± 1,4 пакета в секунду (360 RIPEntry/c). Размер кадра — 446 байт (Ethernet + IPv4 + UDP + RIP header + 400 байт RIPEntry), полоса — около 0,064 Мбит/с. Получается low-rate flood: канал даже близко не насыщен, удар идёт по-другому — каждый пакет дорого обрабатывать на стороне жертвы.

Ход исследования

Схема экспериментов одна и та же для всех трёх платформ: запускаем rip_flood.py со стороны атакующего узла и параллельно снимаем три группы показателей. Первая — загрузка CPU средствами самого устройства: для Cisco это show processes cpu sorted, для MikroTik — /tool profile, для Eltex — show cpu utilization. Вторая — доступность управляющего IP 192.168.1.1 со стороны атакующей машины (ping -c 30), оттуда берём средний RTT, max RTT, долю потерь и mdev. Третья — таблица маршрутизации после атаки (show ip route rip для Cisco и Eltex, /ip route print where rip dynamic для MikroTik). По объёмам серий: n = 5 для CPU на Cisco и MikroTik, n = 3 для Eltex; ICMP — n = 3–4. Выборки пилотные, поэтому в результатах везде указано среднее (M), стандартное отклонение (SD) и число повторов.

Первая платформа — Cisco Catalyst 2960. Тут одноядерный управляющий CPU и нет Control Plane Policing (CoPP появляется только начиная с Catalyst 3560 и выше). В фоне CPU спокойный: 5 % / 5 % / 4 % по интервалам 5 секунд / 1 минута / 5 минут. Сетевые процессы практически не нагружены.

Запускаем атаку и снимаем серию из пяти замеров. Средняя пиковая загрузка CPU за пятисекундный интервал — 92,6 ± 8,9 % (n = 5). По прогонам цифры были такие: 79 %, 99 %, 99 %, 88 %, 98 %. Если разобрать по процессам, основной потребитель — IP Input, в среднем 53,7 ± 4,2 %. Это говорит о том, что каждый поступающий multicast RIP-пакет коммутатор обрабатывает программно, аппаратного отсева нет.

```
Switch#show processes cpu sorted
CPU utilization for five seconds: 99%/25%; one minute: 14%; five minutes: 6%
 PID Runtime(ms)     Invoked      uSecs   5Sec   1Min   5Min TTY Process
 191        6495         466      13937 58.71%  5.35%  1.11%   0 IP Input
 130        1287       14054         91  8.95%  0.87%  0.18%   0 Hulc LED Process
  72         124       29670          4  0.47%  0.05%  0.01%   0 Fifo Error Detec
 166          35        5617          6  0.31%  0.02%  0.00%   0 UDLD
 142         145         241        601  0.15%  0.04%  0.00%   0 HRPC qos request
  42           8         556         14  0.15%  0.01%  0.00%   0 TTY Background
 131           8         416         19  0.15%  0.01%  0.00%   0 HL3U bkgrd proce
 190           9       16768          0  0.15%  0.01%  0.00%   0 IP ARP Retry Age
   7           0           2          0  0.00%  0.00%  0.00%   0 Timers
   8           0          23          0  0.00%  0.00%  0.00%   0 WATCH_AFS
   9        2241         158      14183  0.00%  0.00%  0.08%   0 crypto sw pk pro
--More--
```

Рисунок 1 — Загрузка CPU коммутатора Cisco Catalyst 2960 в ходе RIP-flood (show processes cpu sorted)

Параллельно с CPU мерили доступность управляющего интерфейса. Под атакой средние потери ICMP составили 50,8 ± 30,4 %, а средний RTT вырос с 6,24 ± 3,32 мс в фоне до 21,4 ± 8,5 мс. Половина пакетов до управляющего IP просто не доходит — это и есть прямое количественное подтверждение того, что control plane выводится из строя по T1499.002. Максимальный RTT упирается в характерный потолок около 33 мс, что похоже на верхнюю границу очереди обработки IP Input в Cisco LAN Base.

После атаки смотрим таблицу маршрутизации. Видим записи вида R 10.X.Y.0/24 [120/1] via 192.168.1.2: административная дистанция 120, метрика 1. То есть атакующий не только грузит CPU, но и реально подсовывает фейковые маршруты — и трафик пойдёт через него. debug ip rip подтверждает, что коммутатор принимает наши RIP v2 Response. После окончания атаки и команды clear ip route * таблица восстанавливается до исходного состояния — остаётся только подключённая сеть.

```
*Mar  4 00:55:33.425:      10.10.10.10/24 via 0.0.0.0 in 1 hops
*Mar  4 00:55:33.760: RIP: received v2 update from 192.168.1.2 on FastEthernet0/2
*Mar  4 00:55:33.760:      10.10.10.10/24 via 0.0.0.0 in 1 hops
*Mar  4 00:55:33.970: RIP: received v2 update from 192.168.1.2 on FastEthernet0/2
*Mar  4 00:55:33.970:      10.10.10.10/24 via 0.0.0.0 in 1 hops
*Mar  4 00:55:34.222: RIP: received v2 update from 192.168.1.2 on FastEthernet0/2
*Mar  4 00:55:34.222:      10.10.10.10/24 via 0.0.0.0 in 1 hops
*Mar  4 00:55:34.373: RIP: received v2 update from 192.168.1.2 on FastEthernet0/2
*Mar  4 00:55:34.373:      10.10.10.10/24 via 0.0.0.0 in 1 hops
*Mar  4 00:55:34.658: RIP: received v2 update from 192.168.1.2 on FastEthernet0/2
*Mar  4 00:55:34.658:      10.10.10.10/24 via 0.0.0.0 in 1 hops
*Mar  4 00:55:34.784: RIP: received v2 update from 192.168.1.2 on FastEthernet0/2
*Mar  4 00:55:34.784:      10.10.10.10/24 via 0.0.0.0 in 1 hops
*Mar  4 00:55:34.952: RIP: received v2 update from 192.168.1.2 on FastEthernet0/2
*Mar  4 00:55:34.952:      10.10.10.10/24 via 0.0.0.0 in 1 hops
*Mar  4 00:55:35.153: RIP: received v2 update from 192.168.1.2 on FastEthernet0/2
*Mar  4 00:55:35.153:      10.10.10.10/24 via 0.0.0.0 in 1 hops
*Mar  4 00:55:35.312: RIP: received v2 update from 192.168.1.2 on FastEthernet0/2
*Mar  4 00:55:35.312:      10.10.10.10/24 via 0.0.0.0 in 1 hops
*Mar  4 00:55:57.810: RIP: sending v2 update to 224.0.0.9 via FastEthernet0/2 (192.168.1.1)
*Mar  4 00:55:57.810: RIP: build update entries - suppressing null update
```

Рисунок 2 — Поддельные RIP-маршруты в таблице маршрутизации Cisco после атаки (show ip route rip)

Получается, что на одноядерной LAN Base-платформе RIP-flood работает как гибридный вектор: одним и тем же потоком пакетов мы и грузим control plane (это T1499.002), и манипулируем таблицей маршрутов (это уже ближе к Network Boundary Bridging). Считать атаку только T1499.002 в такой ситуации — неполно.

Следующая платформа — MikroTik CRS326. Тут картина другая: до полной перегрузки control plane не доходит. Серия из пяти прогонов под атакой даёт среднюю total-загрузку CPU 56,3 ± 13,3 % (n = 5). Если посмотреть, кто именно грузит CPU: routing — 33,3 ± 10,5 %, prestera_dx_mac (драйвер свитч-чипа Marvell Prestera) — 14,3 ± 7,9 %, networking — 5,4 ± 2,6 %, kernel — 1,7 ± 1,5 %. Двухкомпонентная нагрузка отражает аппаратную особенность платформы: каждый пакет, который свитч-чип передаёт на CPU по каналу chip-to-CPU, нагружает драйвер сопоставимо с программной RIP обработкой.

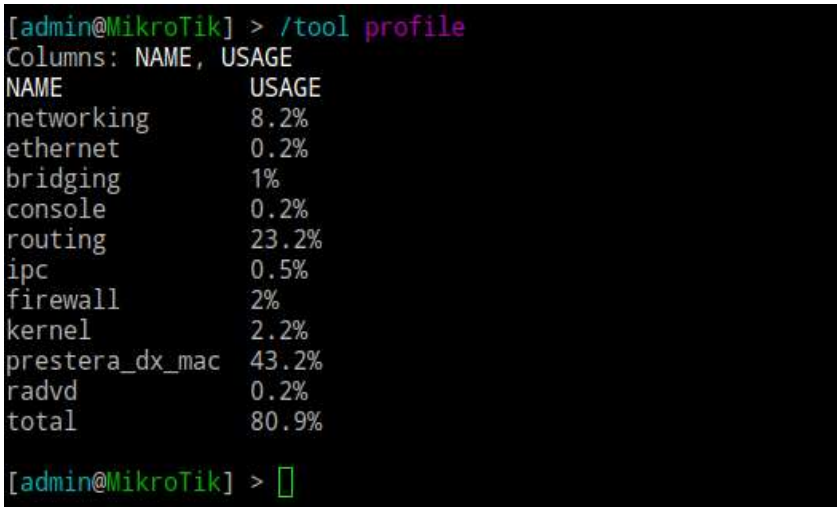


Рисунок 3 — Декомпозиция загрузки CPU MikroTik CRS326 под нагрузкой (/tool profile)

ICMP-доступность управляющего интерфейса MikroTik внешне в порядке: потерь нет ни в одном из трёх прогонов. Но максимальный RTT прыгает с 4,78 ± 2,85 мс в фоне до 21,04 ± 3,51 мс под атакой — рост в 4–6 раз. Это значит, что отдельные пакеты сидят в очередях гораздо дольше обычного. Средний RTT при этом на самом деле растёт куда мягче — с 2,49 до 3,19 мс. Похоже, свитч-чип частично обслуживает ICMP сам, поэтому средний показатель не страдает, а вот всё, что доходит до CPU, ждёт в очереди. По нашей терминологии это частичная деградация, то есть без полного отказа.

И главное отличие от Cisco — никакого route injection. Команды /ip route print where rip dynamic и /routing rip neighbor print после атаки не показывают ни одного динамического маршрута и ни одного RIP-соседа. В таблице указана только подключённая сеть. По документации RouterOS 7 [5], пакет RIP вообще не пройдёт дальше парсера, если интерфейс-источник не привязан к interface-

template данного RIP-instance, а адрес отправителя не сидит в ассоциированной подсети. Сверху ещё проверяется контрольная сумма. То есть MikroTik не «просто строже фильтрует», у него есть конкретный документированный механизм валидации источника — именно он и спасает.

Третья платформа, которую использовали — это Eltex ESR-15R. Это уже отечественное решение, четырёхъядерный CPU с разделением функций: одни ядра под управление, другие под обработку пакетов. В серии из трёх прогонов под атакой нагрузка распределяется именно так, как и ожидалось: обработка RIP уходит на ядра CPU2 и CPU3, средние значения — 43,3 ± 0,14 % и 43,4 ± 0,20 %. А управляющее ядро CPU0, на котором работают CLI, SSH и NETCONF, держится на 6,1 ± 2,0 % — это уровень фонового шума.

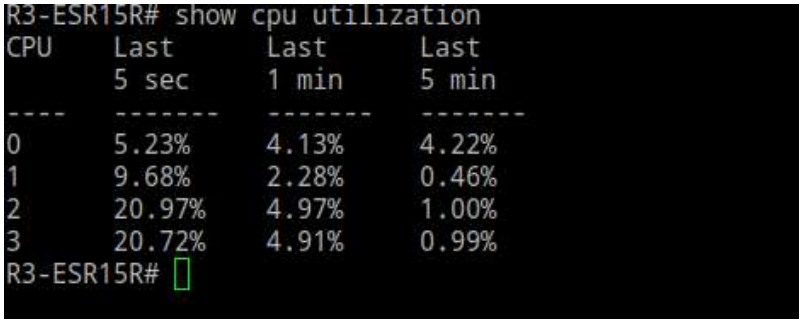


Рисунок 4 — Распределение нагрузки по ядрам CPU Eltex ESR-15R под атакой (show cpu utilization)

Малое стандартное отклонение для CPU2 и CPU3 (меньше 0,2 %) на первый взгляд выглядит подозрительно, но объяснение простое: поток атаки однородный по времени и по содержимому, планировщик networking ровно раздаёт его между выделенными ядрами, FIFO-очереди на сетевом контроллере сглаживают джиттер. Получается квазистационарный режим, в котором каждый замер, по сути, ловит одну и ту же картину. Для многоядерных платформ с аппаратной разгрузкой такое поведение нормальное.

На Eltex плоскость управления под атакой почти не страдает. Средний RTT поднимается с 1,52 мс до 1,75 ± 1,10 мс — это +15 %. Максимальный RTT — с 5,73 до 7,84 ± 5,30 мс. ICMP — 0 % потерь. То есть управляющий интерфейс остаётся доступным, а это и есть главный критерий по T1499.002: атака считается успешной, если ресурс становится недоступным. На Eltex такого не происходит. show ip route rip после атаки тоже пустой — поддельные маршруты не залетели.

Вывод по Eltex такой: архитектурное разделение управляющего ядра и ядер обработки пакетов реально работает — оно даёт серьёзный запас прочности control plane по сравнению с одноядерными железками. Для темы импортозамещения это любопытная находка: отечественная коробка по

типовой атаке данного класса ведёт себя как минимум не хуже зарубежных аналогов [6].

Сводная картина по всем трём платформам указана в таблице 2.

Таблица 2 — Сравнение реакции платформ на атаку RIPv2-flood (T1499.002)

Показатель	Cisco Catalyst 2960	MikroTik CRS326	Eltex ESR-15R
CPU фон (5 сек)	5 %	0,8 % total	~4 % (CPU0)
CPU пик под атакой	92,6 ± 8,9 % (n=5)	56,3 ± 13,3 % (n=5)	43,3 ± 0,14 % (CPU2, n=3)
Управляющее ядро	Перегружено	Нагружено	CPU0 = 6,1 ± 2,0 % (сохранено)
ICMP потери под атакой	50,8 ± 30,4 %	0 %	0 %
Avg RTT, мс (фон → атака)	6,24 → 21,4 ± 8,5	2,49 → 3,19 ± 1,93	1,52 → 1,75 ± 1,10
Max RTT, мс (фон → атака)	≈ 33	4,78 → 21,04 ± 3,51	5,73 → 7,84 ± 5,30
Route injection	Зафиксирован	Не зафиксирован	Не зафиксирован
Доступность управления	Полная деградация	Частичная деградация	Сохраняется

Если выстроить платформы по устойчивости control plane от лучшей к худшей, получится: Eltex ESR-15R → MikroTik CRS326 → Cisco Catalyst 2960. Разрыв между ними на самом деле большой: на управляющем ядре у Cisco 92,6 %, а у Eltex 6,1 %. Это на порядок больше внутренних разбросов в сериях замеров, поэтому такое ранжирование не разваливается от пилотного объёма выборки. Отдельно стоит подчеркнуть: канал атакующего потока — меньше 0,1 Мбит/с, а Cisco от него уходит в перегрузку. Это про асимметрию: сгенерировать RIP-пакет ничего не стоит, а обработать его на одноядерном железе — стоит дорого. Атака работает не объёмом, а точкой приложения.

Чтобы закрыться от RIPv2-flood и связанных гибридных эффектов, разумно собирать защиту слоями. Самый дешёвый слой — на уровне протокола: включить аутентификацию RIPv2 (MD5 HMAC по RFC 2082 [2] или криптографическую). Неподписанные пакеты тогда отсекаются ещё до парсинга, и атака просто не доходит до маршрутного процесса. На уровне конфигурации устройства: passive-interface на всех портах, где RIP не нужен; ACL, которые режут UDP/520 от любых сомнительных источников; Control Plane Policing там, где платформа его поддерживает. И уже на архитектурном уровне: при выборе оборудования смотреть на многоядерные платформы с разделением управляющего и пакетного ядер; сегментировать

широковещательные домены, чтобы зона распространения атакующего трафика была минимальной; а в новых развёртываниях вообще уходить с RIP на OSPFv2 с криптоаутентификацией.

Заключение

В работе мы прогнали три типовых сценария: посмотрели, как сетевое оборудование от разных производителей реагирует на одну и ту же атаку RIPv2-flood, которая по MITRE ATT&CK относится к технике T1499.002.

На Cisco Catalyst 2960 атака сработала как гибрид: одновременно перегрузила управляющий CPU до 92,6 ± 8,9 %, выбила ICMP-доступность (потери 50,8 ± 30,4 %) и подсунула в таблицу маршрутизации фейковые маршруты. На MikroTik CRS326 — частичная деградация: CPU вырастает до 56,3 ± 13,3 %, максимальный RTT прыгает в 4–6 раз, но потерь нет, и поддельных маршрутов в таблице тоже нет, получается спасла встроенная валидация источника в RouterOS 7. На Eltex ESR-15R разделение ядер сделало своё: управляющее ядро CPU0 спокойно держится на 6,1 ± 2,0 %, нагрузка уходит на CPU2/CPU3 (43,3 ± 0,14 %), ICMP не страдает, поддельные маршруты в таблицу не попали.

Из всего этого видно, что устойчивость плоскости управления к атакам класса Service Exhaustion в первую очередь упирается в две вещи: архитектура CPU и наличие в прошивке внятных, документированных механизмов проверки источника протокольных обновлений. И отдельный вывод — про сам вектор: RIPv2-flood гибридный, одним и тем же действием бьёт по двум целям сразу (T1499.002 + route injection). Так что в моделях угроз эту атаку имеет смысл разносить по двум техникам, а не натягивать только на T1499.002.

Если коротко по ранжированию: Eltex ESR-15R → MikroTik CRS326 → Cisco Catalyst 2960. Чтобы вывести Cisco LAN Base из строя, хватает атаки в 18 пакетов в секунду — меньше 0,1 Мбит/с. И это, пожалуй, главный практический вывод: low-rate flood работает не объёмом канала, а тем, что обработка одного RIP-пакета на жертве стоит в разы дороже, чем его генерация на стороне атакующего.

Что хочется доделать дальше. Во-первых, автоматизировать сбор CPU через SNMP, чтобы построить непрерывный график атаки во времени, а не работать срезами. Во-вторых, поставить tcpdump со стороны Eltex и напрямую увидеть, как идут RIP-пакеты — это закроет вопрос с тем, что у Eltex в CLI нет таких диагностических команд, как у Cisco. И в-третьих, протестировать ту же методику на железе другого класса и при других диапазонах интенсивности атаки — посмотреть, где порог, после которого даже Eltex начинает сдавать.

Список литературы:

1. Malkin G. RFC 2453: STD 56: RIP Version 2 // RFC Editor, 1998. – 39 p.

2. Baker F., Atkinson R. RFC 2082: RIP-2 MD5 Authentication // RFC Editor, 1997. – 12 p.

3. Тарасов Я.В., Макаревич О.Б. Моделирование и исследование низкоинтенсивных DoS-атак на BGP-инфраструктуру // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 12 (149). – С. 101–111. EDN: RSGPDZ

4. Endpoint Denial of Service: Service Exhaustion Flood [Electronic resource] // MITRE ATT&CK. – URL: https://attack.mitre.org/techniques/T1499/002/ (дата обращения: 13.05.2026).

5. RouterOS [Electronic resource] // MikroTik. – URL: https://help.mikrotik.com/docs/ (дата обращения: 13.05.2026).

6. Уймин А.Г., Толмачев И.М. Применение отечественного сетевого оборудования Eltex и EcoRouter в рамках специальности 09.02.06 «Сетевое и системное администрирование». Вопросы импортозамещения и подготовки квалифицированных кадров в сетевом оборудовании // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2025. – № 11(628). – С. 58–62. EDN: DMHQJU

7. Методический документ от 5 февраля 2021 г. [Электронный ресурс] // ФСТЭК России. – URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-5-fevralya-2021-g?ysclid=mrf7wd825f538598701 (дата обращения: 16.05.2026).

8. Крыгин Н.Д. DDoS-атаки и защиты от них // Столыпинский вестник. – 2022. – Т.4, № 4. EDN: SXZJES

9. Hedrick C. RFC 1058: Routing Information Protocol // RFC Editor, 1988. – 31 p.

10. Atkinson R., Fanto M. RFC 4822: RIPv2 Cryptographic Authentication. – RFC Editor, 2007. – 22 p.

11. Sriram K., Montgomery D. Resilient Interdomain Traffic Exchange: BGP Security and DDoS Mitigation: NIST Special Publication 800-189 // National Institute of Standards and Technology, 2019.

12. ГОСТ Р 56546-2015. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Классификация уязвимостей информационных систем. – М.: Стандартинформ, 2018. – 12 с.

13. ГОСТ Р 56545-2015. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Правила описания уязвимостей. – М.: Стандартинформ, 2018. – 8 с.

14. Пирогов Н.С. Оценка уязвимостей протокола BGP // Инновации в науке. – 2018. – №12 (88). – С. 16-18.

15. Муханова А., Ревнивых А., Федотов А. Классификация угроз и уязвимостей информационной безопасности в корпоративных системах // Вестник новосибирского государственного университета. Серия: «Информационные технологии». – 2013. – Т.11, № 2. – С. 55–72. EDN: RCAAZP

16. Scapy documentation [Electronic resource] // Scapy. – URL: https://scapy.readthedocs.io/ (дата обращения: 13.05.2026).

УДК 004.8

Панасенков М. Н.
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ КОНТЕНТА TELEGRAM-КАНАЛОВ: СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

Аннотация. В статье рассматривается задача автоматической генерации контента для Telegram-каналов с позиций системного анализа и управления качеством. Предложена архитектура с генеративным модулем, модулем семантического контроля и обратной связью. На выборке из 200 публикаций проведён сравнительный эксперимент: тексты создавались в разомкнутом и замкнутом контурах. Оценивались семантическая согласованность, фактические ошибки и время генерации. Показано, что аналитический контроллер почти вдвое снижает долю ошибок и заметно повышает связность текста при умеренном росте временных затрат. Результаты подтверждают перспективность гибридных архитектур «генерация – контроль» для автоматизации информационных систем.

Ключевые слова: системный анализ, обработка информации, нейросетевые языковые модели, Telegram-каналы, генерация контента, управление качеством, семантический контроль.

1. Введение

Telegram-каналы превратились в один из главных инструментов распространения новостного и аналитического контента [3]. Постоянный рост объёмов публикаций делает автоматизацию подготовки текстов всё более востребованной [5, 6]. Современные нейросетевые модели (GPT-3.5 и аналоги) способны генерировать связные сообщения, однако попутно порождают фактические ошибки и смысловые противоречия [1, 4]. Возникает задача: как совместить скорость автоматической генерации с приемлемым качеством.

С точки зрения системного анализа процесс создания контента можно представить как объект управления с обратной связью, где параметры генерации влияют на характеристики текста. Цель настоящей работы – разработать и экспериментально проверить архитектуру такой системы для Telegram-каналов, включающую генеративную модель и аналитический модуль контроля. Новизна заключается в сравнительном анализе разомкнутого и замкнутого контуров и в использовании интегрального критерия «качество–время».

2. Материалы и методы

В основу работы положены методы системного анализа, сравнительного моделирования и статистической обработки данных [9]. Система генерации контента разбита на четыре функциональных блока: генеративный модуль на

базе GPT-3.5-turbo [1], модуль семантического контроля, использующий RuBERT [7], модуль анализа проблемных утверждений и подсистему публикации. Telegram-канал при этом рассматривается как объект управления [3], а ключевые параметры вызова модели – температура, top_p, системный промпт и ограничение длины ответа – играют роль управляющих воздействий.

С позиций системного анализа разработанная архитектура представляет собой замкнутую систему управления качеством текстовой информации. Входными воздействиями являются исходная тематика публикации и параметры генерации языковой модели, выходом – сформированный текст публикации, а критерием эффективности выступает интегральный показатель качества, учитывающий семантическую согласованность, фактическую достоверность и время генерации. Возмущающими факторами можно считать стохастический характер работы генеративной модели, неоднозначность естественного языка и различия между тематическими областями. Использование аналитического контроллера позволяет реализовать механизм отрицательной обратной связи, при котором результаты анализа автоматически используются для корректировки параметров последующей генерации.

Чтобы численно оценить, насколько удачно система находит баланс между качеством текста и затратами времени, был введен интегральный критерий

$$J = \alpha \times Q_{sem} - \beta \times E_{fact} - \gamma \times T_{norm} \rightarrow max$$

где Qsem – семантическая согласованность, Efact – частота фактических ошибок, а Tnorm – нормированное время генерации. Время для удобства сравнения приводилось к интервалу [0;1] по линейной формуле

$$T_{norm} = \frac{T_i - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$$

Значимость отдельных показателей определили экспертным путём: α=0,5, β=0,35, γ=0,15.

Семантическая согласованность текста была оценена как среднее косинусное сходство между эмбеддингами соседних предложений; для получения эмбеддингов была использована мультиязычная модель LaBSE [2]. Фактическая достоверность оценивалась методом экспертного анализа публикаций [9]. В ходе оценки выявлялись фактические ошибки, непроверяемые утверждения и логические несоответствия. Итоговый показатель рассчитывался как доля публикаций, содержащих фактические ошибки.

Эксперимент проводился на выборке из 200 публикаций научно-технической тематики: 100 текстов были сгенерированы в разомкнутом контуре, ещё 100 – с включённым аналитическим контроллером.

Логика работы контроллера состояла из двух последовательных этапов. На первом этапе сразу после генерации вычислялась семантическая согласованность текста. Если косинусное сходство между какими-либо соседними предложениями опускалось ниже порога 0,65, публикация

автоматически отправлялась на повторную генерацию. На втором этапе RuBERT анализировал семантические противоречия и низкоуверенные утверждения [7]. Как только обнаруживались признаки потенциальной недостоверности – например, противоречия между соседними высказываниями или излишне категоричные формулировки без опоры на общеизвестные факты, – система модифицировала исходный системный промпт. Типичный вариант скорректированного промпта выглядел так: «Сформируй краткую публикацию в нейтральном стиле. Используй только общеизвестные факты. Избегай категоричных утверждений и непроверяемой информации. При сомнениях применяй осторожные формулировки». Число повторных генераций для одной публикации ограничивалось двумя – это позволяло удержать рост временных затрат в разумных пределах.

Ограничение количества повторных генераций обусловлено необходимостью достижения рационального компромисса между качеством итогового текста и вычислительными затратами. При увеличении числа итераций наблюдается постепенное уменьшение вероятности появления смысловых противоречий, однако прирост качества после второй повторной генерации становится существенно менее выраженным. Поэтому ограничение двумя итерациями позволяет сохранить приемлемое время формирования публикации без заметного ухудшения итоговых характеристик системы.

Для проверки статистической значимости различий применялся t-критерий Стьюдента для независимых выборок (для семантической согласованности и времени генерации), а для доли фактических ошибок использовали критерий x^2 Пирсона. Уровень значимости был принят равным $p < 0,05$.

3. Результаты и их обсуждения

Для оценки эффективности предложенного подхода были сопоставлены результаты работы разомкнутого и замкнутого контуров генерации по трём ключевым показателям [9]: частоте фактических ошибок, семантической согласованности текста и времени генерации публикаций. Сравнение позволяет оценить влияние аналитического контроллера на качество формируемого контента и определить целесообразность использования обратной связи в системе управления.

Основные результаты исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение показателей качества генерации

Показатель	Разомкнутый контур	Замкнутый контур
Частота фактических ошибок	0,27 ± 0,07	0,11 ± 0,05
Семантическая согласованность	0,62 ± 0,08	0,75 ± 0,07
Среднее время генерации, с	2,3 ± 0,5	4,9 ± 0,9

Частота ошибок снизилась примерно на 59% (p=0,003). Семантическая согласованность выросла с 0,62 до 0,75 (p=0,011). Время генерации увеличилось, оставаясь, однако, приемлемым для практики (p=0,001). После нормировки времени интегральный критерий J составил 0,18 для разомкнутого контура и 0,41 для замкнутого, подтверждая более выгодный баланс «качество–время» в системе с обратной связью.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение обратной связи оказывает комплексное влияние на процесс генерации текста. Повышение семантической согласованности связано с повторной генерацией фрагментов, содержащих логические разрывы, тогда как снижение доли фактических ошибок достигается за счёт дополнительной проверки потенциально недостоверных утверждений аналитическим модулем. Несмотря на увеличение времени формирования публикации приблизительно в два раза, абсолютная продолжительность генерации остаётся менее пяти секунд, что является приемлемым показателем для большинства практических сценариев автоматизированной публикации контента. Таким образом, применение аналитического контроллера обеспечивает более устойчивое функционирование системы и позволяет повысить качество генерируемых материалов без существенного снижения производительности.

С системной точки зрения контроллер выполняет роль аналитического регулятора, компенсирующего случайные ошибки генеративной модели и повышающего устойчивость информационной системы [9].

Следует учитывать ограничения исследования: выборка ограничена русскоязычными научно-техническими текстами, экспертная оценка, несмотря на высокую согласованность, сохраняет долю субъективности, а объём выборки (200 публикаций) требует расширения для более общих выводов.

4. Заключение

Проведённое исследование показало, что использование обратной связи в процессе генерации контента позволяет повысить качество автоматически формируемых публикаций. Предложенная архитектура, объединяющая языковую модель и аналитический контроллер, обеспечивает более высокий уровень семантической согласованности текста [1] и способствует снижению количества фактических ошибок по сравнению с разомкнутой схемой генерации.

Полученные результаты подтверждают целесообразность рассмотрения генерации контента как управляемого процесса [9], в котором качество итогового текста зависит не только от возможностей языковой модели, но и от наличия механизмов контроля и корректировки. При этом повышение качества публикаций достигается ценой умеренного увеличения времени их подготовки.

Предложенный подход может быть использован при разработке систем автоматической публикации контента, интеллектуальных помощников и других информационных сервисов [10], в которых важны как скорость формирования

текста, так и его содержательная корректность.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на развитие методов автоматической проверки фактов, использование внешних источников знаний и расширение экспериментальной базы [8] за счёт различных тематик и типов контента. Это позволит более полно оценить возможности применения архитектур с обратной связью в задачах автоматической генерации текстовой информации.

Список литературы:

1. Brown, T. B. Language Models are Few-Shot Learners / T. B. Brown, B. Mann, N. Ryder [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2020. – Vol. 33. – P. 1877–1901.

2. Devlin J. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding / J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, K. Toutanova // Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. – Minneapolis, 2019. – Vol. 1. – P. 4171–4186.

3. Telegram API Documentation – Документация [Электронный ресурс] // Telegram API. – URL: https://core.telegram.org/api (дата обращения: 26.05.2025).

4. Vaswani A. Attention Is All You Need / A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. – Vol. 30. – P. 5998–6008.

5. Гольдберг Й. Нейросетевые методы в обработке естественного языка: руководство / Й. Гольдберг; перевод с английского А. А. Слинкина. – Москва: ДМК Пресс, 2019. – 282 с.

6. Давыдов С. Г. Использование технологий искусственного интеллекта в российских медиа и журналистике / С. Г. Давыдов, А. В. Замков, М. А. Крашенинникова, М. М. Лукина // Вестник Московского университета. Серия 10: «Журналистика». – 2023. – Т.48, № 5. – С. 3–21. DOI: 10.30547/vestnik.journ.5.2023.321.- EDN: ZZJRRX

7. Kuratov Y. Adaptation of Deep Bidirectional Multilingual Transformers for Russian Language / Y. Kuratov, M. Arkhipov // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. – 2019. – С. 333-339. EDN: BBVVKR

8. Косых Н.Е. Применение модели дистилляции знаний BERT для анализа настроений текста // Вестник ВГУ. Серия: «Системный анализ и информационные технологии». – 2022. – № 3. – С. 139–151. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2022/3/139-151.- EDN: CEWSPF

9. Ребенок К. В. Эффективность нейросетевых алгоритмов в автоматическом реферировании и суммаризации текста / К. В. Ребенок // Вестник новосибирского государственного университета. Серия: «Информационные технологии». – 2024. – Т. 22, №4. – С. 49–61. DOI: 10.25205/1818-7900-2024-22-4-49-61 EDN: DUYRLX

10. Шафир Т. В. Интеграция искусственного интеллекта в процессы создания медиаконтента / Т. В. Шафир, Д. Е. Токарский // Вопросы медиабизнеса. – 2025. – Т. 4, № 2. – С. 71–81. DOI: 10.24412/3034-1930-2025-0190.-EDN: KMBZHS

УДК 614.84

Филатов А. Д.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России имени Героя РФ генерала армии Е. Н. Зиничева, Санкт-Петербург, Россия

ПРОТИВОДЫМНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ В ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ: ОТ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ К СОГЛАСОВАННОМУ ФУНКЦИОНИРОВАНИЮ

Аннотация: в статье рассматривается значение противодымной вентиляции как ключевого элемента обеспечения пожарной безопасности общественных зданий. Проанализировано влияние задымления и неконтролируемого газообмена на безопасность людей при пожаре, исследованы принципы построения вытяжной и приточной систем противодымной вентиляции, состав их основных элементов с учётом нормативных требований. Раскрыта роль автоматизированного управления как ключевого фактора, обеспечивающего синхронизацию и устойчивость функционирования системы противодымной вентиляции, на примере конкретного контроллера исследованы алгоритмы управления с учётом требований нормативных документов, а также типовые сценарии эксплуатации, отражающие как штатные, так и аварийные режимы работы.

Ключевые слова: пожарная безопасность; противодымная вентиляция; общественные здания; система противодымной защиты; безопасность эвакуации; автоматизация управления; контроллер.

В современном мире общественные здания являются ключевыми элементами социальной инфраструктуры. Они обеспечивают доступ к жизненно важным услугам, способствуют формированию культурной и экономической жизни общества, создают условия для общения и развития.

Пожары в зданиях такого типа представляют серьёзную опасность для людей. Наиболее опасным фактором является дым. Условия распространения газовых потоков и газообмен очага пожара с внешней средой влияют на размер зоны задымления. Увеличение оптической плотности дыма и достижение предельно допустимой концентрации токсичных продуктов горения повышают угрозу жизни и здоровью людей. Особенно плотное задымление образуется при горении веществ с высоким коэффициентом химического недожога (большинство пластмасс). Диаметр частиц дыма составляет 10^{-4}…10^{-6} м (от 1 до 0,01мкм). Состав продуктов горения зависит от состава горящего вещества и условий его горения. Могут образовываться продукты полного сгорания (углекислый газ, сернистый газ, пары воды, молекулярный азот) и продукты неполного сгорания (угарный газ, углерод в виде сажи, продукты термоокислительного разложения) [3].

Експериментальные данные и опыт тушения пожаров показывают, что при слабой вентиляции опасные для жизни концентрации токсичных газов и большая степень задымленности создаются в течение первых минут. Следует отметить, что дверные проемы, межэтажные пустоты и вентиляционные шахты не обеспечивают защиту от задымления даже на минимальный промежуток времени. Критически важное значение на процесс задымления общественных зданий оказывает работа вытяжных установок. Приточная вентиляция в помещении, где происходит горение, ускоряет задымление, повышает интенсивность горения, увеличивает задымленность соседних помещений. Подача воздуха в смежные с горящим помещения препятствует их задымлению и может исключить проникновение дыма. Забор воздуха вытяжной вентиляцией из горящего помещения снижает задымленность, плотность дыма, но способствует развитию пожара. Забор воздуха вытяжной вентиляцией из соседних с горящим помещением способствует его задымлению [4]. Таким образом становится очевидно, что борьба с задымлением при пожаре является одним из важнейших элементов обеспечения пожарной безопасности общественного здания.

В рамках системы противодымной защиты Федеральным законом от 22.07.2008 № 123 - ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» предусмотрено применение следующих способов защиты:

- объемно-планировочные решения;
- конструктивные решения;
- создание избыточного давления воздуха;
- удаление продуктов горения механической и естественной вытяжной противодымной вентиляцией [1].

Наиболее эффективным вариантом дымоудаления при пожаре является сочетание приточной и вытяжной систем противодымной вентиляции. Эффективность обусловлена одновременным решением двух важных задач: дым из здания удаляется, а в ключевых зонах (лестничные клетки, лифтовые шахты, тамбур-шлюзы) создаётся избыточное давление, которое не позволяет дыму распространяться на пути эвакуации и безопасные зоны. На рисунке 1 представлен пример совместной работы приточной и вытяжной систем противодымной вентиляции.

Рис. 1. Работа приточной и вытяжной систем противодымной вентиляции

Системы противодымной вентиляции представляют собой интегрированный комплекс технических средств; их работоспособность напрямую определяется степенью согласованности функционирования отдельных компонентов и корректностью заложенных алгоритмов управления. Согласно нормативным требованиям, противодымная защита обеспечивается раздельным, но согласованным действием приточной и вытяжной вентиляции, ориентированным на конкретные зоны здания [2]. В связи с этим целесообразно рассмотреть состав элементов обеих систем.

Основными элементами вытяжной противодымной вентиляции являются:

- вентиляторы дымоудаления, сохраняющие работоспособность при высоких температурах (например, 200 °С в течение 0,5 ч, 300 °С — 0,5 ч, 400 °С — 2 ч и т.п.);
- приёмно-контрольный блок для запуска вентилятора;
- воздуховоды и каналы из негорючих материалов, с нормируемым пределом огнестойкости и классом герметичности В;
- противопожарные клапаны с нормируемым пределом огнестойкости;
- сигнально-пусковой блок для управления положением клапанов и контролем их состояния;
- центральный сетевой контроллер, который запускает определённый алгоритм срабатывания систем;
- элементы выброса продуктов горения (дымовые люки, решетки на наружной стене, отдельные шахты на поверхности земли);
- резервированный источник питания;
- обратный клапан для предотвращения обратного потока газов при остановке системы.

Каждый из указанных элементов выполняет строго определённую функцию в поддержании безопасных параметров воздушной среды при

пожаре. Для построения и функционирования систем приточной противодымной вентиляции используют:

- вентилятор подпора нагнетает свежий воздух в защищаемое пространство или помещение;
- воздуховоды и каналы из негорючих материалов класса герметичности В;
- обратный клапан у вентилятора;
- приемные устройства для забора наружного воздуха;
- противопожарные клапаны в каналах подачи воздуха с нормируемым пределом огнестойкости;
- датчики температуры позволяющие контролировать температуру приточного воздуха;
- воздухонагреватели для подогрева, подаваемого в помещения безопасных зон воздуха;
- твердотельное реле, которое позволяет регулировать мощность воздухонагревателя;
- контроллер;
- клапан/датчик избыточного давления, чтобы избежать сложности с открыванием дверей (давление не должно превышать 150 Па).

Приведённые выше перечни элементов приточной и вытяжной систем противодымной вентиляции наглядно демонстрируют значительную номенклатуру технических средств, задействованных в противодымной защите здания. Эффективная реализация проектных решений, исключающая несогласованность срабатывания отдельных устройств, возможна при наличии централизованной системы управления. Несвоевременное или несогласованное срабатывание хотя бы одного компонента способно нарушить расчётный баланс воздушных потоков и поставить под угрозу безопасность людей. Для обеспечения гарантированной синхронизации работы всех технических средств применяется центральный сетевой контроллер. Типовым решением на базе оборудования «Болид» выступает контроллер С2000-КДЛ, выполняющий функции координации и контроля всех подключённых устройств. Внешний вид контроллера представлен на рисунке 2.

Алгоритм контроллера строится по принципу «обнаружение → верификация → запуск → контроль исполнения». Контроллер С2000-КДЛ не принимает решение о пожаре самостоятельно: он исполняет команды, поступающие от системы пожарной сигнализации (обычно через пульт или АРМ), и реализует проектную логику на уровне адресной линии [6].

Рис. 2. Внешний вид контроллера С2000-КДЛ

Типовой алгоритм при поступлении сигнала «Пожар» для зоны дымоудаления:

1. Приём и идентификация события. Контроллер получает адресное сообщение о пожаре с указанием зоны (например, «коридор 5-го этажа») и типа извещателя.
2. Проверка условий запуска. В зависимости от настройки логики («один извещатель» или «два извещателя по схеме И») контроллер подтверждает необходимость запуска. Это снижает вероятность ложных срабатываний.
3. Формирование последовательности команд. На основании заранее запрограммированной логики контроллер выдаёт команды на адресные блоки управления:

- открыть дымовые клапаны в зоне задымления и на путях эвакуации;
- закрыть противопожарные клапаны в смежных зонах (для локализации дыма);
- запустить вентилятор дымоудаления (с учётом времени на открытие клапанов, чтобы избежать перегрузки двигателя и резких перепадов давления);
- подать сигнал на запуск вентилятора подпора воздуха (в лестничную клетку/тамбур-шлюз).

4. Контроль исполнения. Контроллер считывает обратные сигналы от исполнительных устройств: «клапан открыт», «вентилятор в работе», «авария». Если статус не соответствует ожидаемому, фиксируется неисправность.
5. Передача состояния на верхний уровень. Текущий статус («запуск», «ошибка», «норма») передаётся на пульт и в АРМ для диспетчера.

В алгоритмах контроллера критически важны временные параметры. Они обеспечивают аэродинамическую устойчивость системы и

защищают оборудование. Для С2000-КДЛ характерны следующие временные задержки:

1. Задержка запуска вентилятора дымоудаления (обычно 10–30 с после начала открытия клапанов) нужна, чтобы сначала обеспечить путь для удаления дыма и избежать резкого скачка давления, который может повредить воздуховоды или двери.
2. Последовательность открытия клапанов в вытяжной сети может быть каскадной (по зонам), чтобы не создавать пиковых нагрузок на сеть и двигатель вентилятора.
3. Синхронизация с подпором воздуха: вентилятор подпора запускается либо одновременно, либо с небольшой задержкой после дымоудаления, чтобы не «перекрывать» друг друга по давлению.

Эти задержки закладываются на этапе проектирования и программируются в контроллере как часть логики. Их значения обосновываются аэродинамическим расчётом (баланс притока и вытяжки, потери давления, геометрия сети) и требованиями СП 7.13130.2013. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности.

Контроллер отрабатывает не только «идеальные» сценарии, но и типовые отклонения:

1. Ложное срабатывание. Если сигнал «Пожар» снимается до запуска исполнительных устройств, контроллер отменяет команды и возвращает клапаны в исходное состояние (нормально закрытые/открытые по проекту).
2. Отказ линии или устройства. При потере связи с адресным блоком или отсутствии подтверждения «клапан открыт» контроллер формирует сигнал «Неисправность» и передаёт его на верхний уровень. При этом он не блокирует работу всей системы, а локализует проблему.
3. Ручной пуск. Сигнал от устройства дистанционного пуска имеет приоритет и запускает тот же алгоритм, что и автоматическая сигнализация, но с пометкой «ручной запуск» для диспетчера.
4. Тестовый режим. Возможен запуск отдельных устройств (клапанов, вентиляторов) в тестовом режиме без активации полного сценария — это нужно для технического обслуживания и проверки работоспособности [5].

Таким образом, система противодымной вентиляции является одним из ключевых элементов комплексной противопожарной защиты общественного здания. Её эффективность определяется не только правильным подбором отдельных технических средств — дымоприёмных устройств, клапанов, вентиляторов, воздуховодов, — но и обеспечением их согласованного функционирования. Особую значимость в этой структуре приобретает централизованное управление. Многообразие элементов и жёсткие временные

требования к их срабатыванию делают обязательным применение специализированных средств автоматизации. Контроллер выполняет роль координирующего узла, реализуя проектные алгоритмы, а также обеспечивая интеграцию с системой пожарной сигнализации и верхним уровнем диспетчеризации. Надёжность противодымной защиты общественного здания достигается: корректным расчётом и подбором оборудования, грамотным взаимодействием приточной и вытяжной систем противодымной вентиляции по аэродинамическим параметрам, точным выполнением алгоритмов управления, что в совокупности обеспечивает выполнение требований нормативных документов и, главное, — безопасность людей при пожаре.

Список литературы:

1. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 N 123-ФЗ [Электронный ресурс] // СПС КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/?ysclid=mreydat9ti346521567 (дата обращения: 25.06.26).
2. Приказ МЧС РФ от 21 февраля 2013 г. № 116 «Об утверждении свода правил СП 7.13130 «Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности» [Электронный ресурс] // СПС Гарант. – URL: https://base.garant.ru/70333778/ (дата обращения: 25.06.26).
3. Коробейникова Е.Г., Кожевин Д.Ф., Кожевникова Н.Ю. Теоретические основы процессов горения и тушения // СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2022. – 436 с. EDN: WJCBOE
4. Молчанова Т.А., Сторонкина О.Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров: учебное пособие // Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. – 145 с.
5. ИСО «ОРИОН». Каталог типовых решений [Электронный ресурс] // Системы безопасности Ганимед СБ. – URL: https://ganimedsb.ru/tipovyie-resheniya/iso-orion-ot-bolid.html?ysclid=mreyod96pz270637127 (дата обращения: 25.06.26).
6. Приборы для организации сбора показаний с импульсным выходом [Электронный ресурс] // Грумант. – URL: https://www.grumant.ru/production/catalog/00001468 (дата обращения: 25.06.26).

УДК 004.732:004.056.53

Степанов Р.В., Хорт М.Ю.
ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АТАКИ CAM-TABLE OVERFLOW И МЕТОДОВ ЕЁ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ

Аннотация: В работе проведено экспериментальное исследование атаки переполнения таблицы коммутации (CAM-Table Overflow, MAC-флудинг) и сравнительная оценка эффективности механизмов её нейтрализации на оборудовании: Cisco Catalyst 2960, Eltex MES и MikroTik. Атака реализована утилитой macof с узла Kali Linux (192.168.1.1); цель атаки — это переход коммутатора в режим лавинной рассылки и пассивный перехват трафика жертвы (192.168.1.2). Зафиксирована утечка трафика: при переполнении таблицы на интерфейсе атакующего наблюдались чужие кадры, включая служебные дейтаграммы netbios-dgm, и рост потери ICMP-пакетов до 88,9 %. После применения защиты port-security на Cisco в таблице во время атаки оставалась 1 динамическая запись (всего 21), на Eltex наблюдается 2 записи (срабатывание ограничения), а на MikroTik при ограничении max-learned-entries=1024 счётчик составил 1026 записей (1024 + 2 локальные). Показано, что аппаратный port-security (Cisco, Eltex) обеспечивает детерминированную блокировку и предотвращает fail-open, механизмы MikroTik же (bridge filter, max-learned-entries, unknown-unicast-flood=no) ограничивает таблицу лишь до настроенного лимита и технически не равен port-security. Атака классифицирована по MITRE ATT&CK как T1040 (Network Sniffing) с механизмом исчерпания ресурса (класс T1499).

Ключевые слова: CAM table Overflow, Port security, Cisco, Eltex, Mikrotik, коммутатор, атака на коммутатор, защита.

Введение

Локальные сети объектов топливно энергетического комплекса строятся на коммутаторах канального уровня, безопасность которых нередко остаётся вне периметра контроля. Одной из базовых и при этом недооценённых угроз L2 является атака переполнения таблицы коммутации — CAM-Table Overflow. Коммутатор хранит соответствия MAC-адреса и порта в таблице коммутации и пересылает одноадресный (unicast) кадр только в тот порт, за которым выучен адрес назначения. Атакующий с помощью генератора кадров со случайными MAC-адресами (например утилита macof из набора dsniff) исчерпывает ёмкость таблицы; легитимные записи вытесняются, и коммутатор переходит в режим fail-open, рассылая неизвестные одноадресные кадры во все порты, то есть начинает работать как хаб [1, 3]. Это открывает возможность пассивного перехвата чужого трафика (рис. 2).

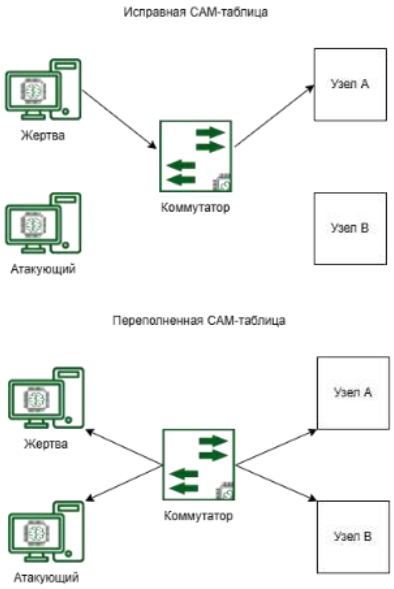


Рисунок 1 — Механизм перехода коммутатора в режим fail-open при переполнении CAM

Классификация по MITRE ATT&CK.

Конечная цель атаки это пассивный перехват трафика, что соответствует технике **T1040 «Network Sniffing»** (тактики Credential Access, TA0006 и Discovery, TA0007); в матрице MITRE MAC-флудинг прямо указан как способ, переводящий коммутатор в режим хаба для последующего сниффинга [1]. Сам механизм атаки — исчерпание аппаратного ресурса коммутатора — относится к классу отказа в обслуживании (T1499 «Endpoint Denial of Service», подтип исчерпания ресурсов); таким образом, корректнее рассматривать CAM-Table Overflow как **разведывательно-перехватную** атаку, в которой DoS-подобное исчерпание ресурса является не целью, а средством включения утечки (sniffing-enabling). В банке данных угроз (БДУ) ФСТЭК России соответствующие угрозы относятся к перехвату данных в пределах широковещательного домена.

Объект и предмет исследования.

Объект — это процесс защиты L2-инфраструктуры от перехвата трафика, вызванного переполнением таблицы коммутации. Предмет — это эффективность механизмов нейтрализации MAC-флудинга (port-security и его программных аналогов) на оборудовании Cisco Catalyst 2960, Eltex MES и MikroTik RouterOS 7.22.

Гипотеза.

Аппаратный port-security детерминированно предотвращает переход в fail-open (число выученных динамических записей на порту не превышает заданного лимита, а утечка чужого трафика прекращается), тогда как программные ограничения MikroTik снижают, но не устраняют риск, ограничивая таблицу лишь до настроенного потолка.

Цель.

Целью является сравнительный анализ эффективности защиты от CAM-Table Overflow на оборудовании Cisco, Eltex и MikroTik.

Задачи:

1. развернуть стенд с атакующим узлом (Kali Linux, macof) и жертвой (ALT Linux);
2. воспроизвести атаку и зафиксировать переполнение таблицы и факт утечки;
3. настроить защиту (port-security на Cisco/Eltex; bridge-механизмы на MikroTik) и оценить её эффективность по количественным показателям состояния таблицы и прекращения утечки;

Обзор литературы

Проблема безопасности канального уровня системно описана в работе Altunbasak et al. (2005): авторы относят MAC-флудинг к наиболее распространённым L2-атакам, при которой генерация множества кадров со случайными MAC-адресами переполняет CAM-буфер и принуждает коммутатор к широковещательной рассылке по всем интерфейсам; в качестве штатной меры защиты указан механизм port-security, ограничивающий число MAC-адресов на порту и блокирующий порт при превышении лимита [3]. Yeung et al. (2008) систематизируют инструменты атак на L2-инфраструктуру, включая утилиту macof, и подтверждают, что port-security и привязка MAC к порту являются базовыми контрмерами [4]. Документация вендоров уточняет реализацию: Cisco описывает port-security с режимами реакции на нарушение (protect/restrict/shutdown) и sticky адресами [7], Eltex — аналогичный механизм для серии MES [8], а MikroTik — модель моста RouterOS с таблицей хостов, параметрами max-learned-entries, unknown-unicast-flood и bridge filter [9]. Служебный протокол NetBIOS over TCP/IP, дейтаграммы которого фигурируют в эксперименте как индикатор утечки, стандартизирован в RFC 1001/1002 [5, 6].

Несмотря на проработанность темы, в доступной литературе не обнаружено сопоставимого экспериментального сравнения защиты от CAM-Table Overflow на оборудовании Cisco, Eltex и MikroTik одновременно, с количественной фиксацией состояния таблицы и факта утечки. Российские исследования рассматривают применение отечественного оборудования Eltex в учебном процессе [10], но без сравнительного анализа защиты L2. Данная работа восполняет этот пробел.

Методология эксперимента

Топология стенда (рис. 2): атакующий узел и узел-жертва подключены к одному коммутатору (исследуемое устройство, DUT) в сети 192.168.1.0/24, VLAN 1, единый широковещательный домен. В роли DUT последовательно выступали Cisco Catalyst 2960, Eltex MES и MikroTik RouterOS 7.22. Состав и версии программно-аппаратного обеспечения приведены в таблице 1.

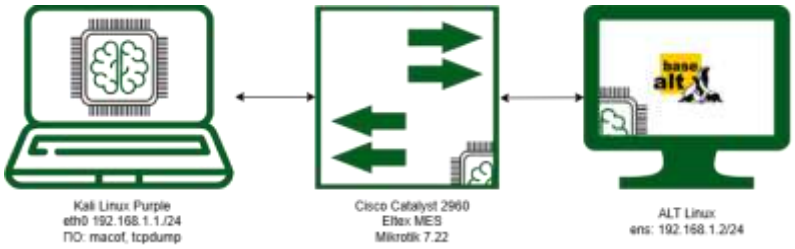


Рисунок 2 — Топология лабораторного стенда с адресацией

Таблица 1 — Состав и версии стенда

Компонент	Роль	Адрес / версия
Kali Linux (Purple)	Атакующий узел	eth0 192.168.1.1/24
ALT Linux	Узел-жертва	192.168.1.2/24
Cisco Catalyst 2960	DUT (коммутатор)	Cisco IOS, VLAN 1
Eltex MES	DUT (коммутатор)	ПО MES, VLAN 1
MikroTik	DUT (мост)	RouterOS 7.22, bridge1 (ether1, ether2)
macof (dsniff)	Генератор MAC-флуда	команда: macof -i eth0
tcpdump	Анализатор трафика	tcpdump -i eth0 host 192.168.1.2

Процедура.

Для каждого DUT выполнялись пять шагов: (1) сброс конфигурации и фиксация исходной таблицы коммутации; (2) запуск атаки командой macof -i eth0 (генерация TCP-SYN-кадров со случайными MAC- и IP-адресами, рис. 3) и фиксация таблицы во время атаки; (3) проверка факта утечки перехватом трафика жертвы утилитой tcpdump; (4) включение защиты и повторный запуск атаки; (5) фиксация состояния таблицы при включённой защите. Показателями служили: число записей в таблице (до/во время/после), факт перехвата чужого трафика и потери ICMP-пакетов жертвы.

Рисунок 3 — Запуск атаки macof: поток кадров со случайными MAC-адресами

Оценка времени переполнения.

Утилита macof по умолчанию генерирует порядка 155 000 кадров в минуту (≈ 2580 кадр/с). При документированной ёмкости CAM Cisco Catalyst 2960 около 8192 MAC-записей теоретическое время заполнения таблицы составляет t ≈ 8192 / 2580 ≈ 3,2 с, что объясняет практически мгновенный переход незащищённого коммутатора в режим fail-open. Для программного моста MikroTik таблица хостов не ограничена малым аппаратным потолком и без специальных настроек растёт практически неограниченно (до исчерпания памяти).

Результаты

1. Cisco Catalyst 2960.

До атаки таблица содержала только 20 статических служебных записей (закреплённых за CPU) и не имела динамических. Во время атаки без защиты таблица начала стремительно заполняться динамическими записями (DYNAMIC), привязанными к порту атакующего Fa0/1 (рис. 4), что соответствует переходу в fail-open.

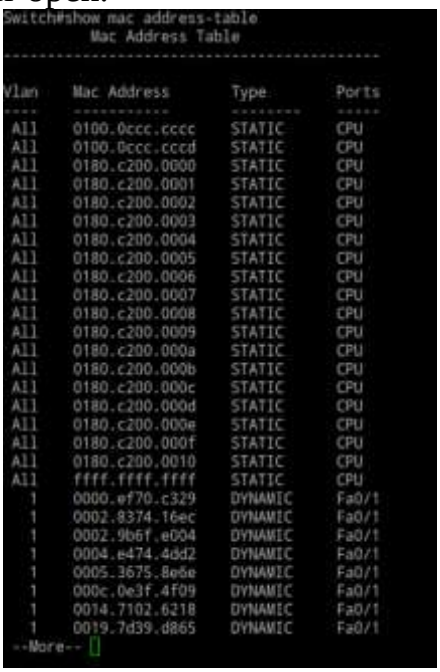


Рисунок 4 — Таблица MAC Cisco во время атаки без защиты (поток DYNAMIC-записей на Fa0/1)

Факт утечки подтверждён перехватом: командой tcpdump -i eth0 host 192.168.1.2 на интерфейсе атакующего фиксировались кадры, исходящие от жертвы 192.168.1.2, включая служебные дейтаграммы NetBIOS Datagram Service (netbios-dgm, UDP/порт 138), направленные на широковещательный адрес 192.168.1.255 (рис. 5).

Рисунок 5 — Перехват трафика жертвы: дейтаграммы netbios-dgm (UDP/138) в дампе атакующего

Почему netbios-dgm является индикатором.

NetBIOS Datagram Service (UDP/138) — часть стека NetBIOS over TCP/IP (RFC 1001/1002), отвечающая за бессеансовую рассылку. Через него передаются объявления службы обзора сети (SMB Browser): имена узлов, имена рабочих групп и доменов, сведения о ролях узлов. Практическая опасность состоит в утечке разведывательной информации: пассивно собирая такие дейтаграммы, атакующий получает карту сети, имена хостов и состав рабочих групп без активного сканирования. Важно методологически уточнить: в данном дампе netbios-dgm направлены на широковещательный адрес 192.168.1.255 и потому в принципе видимы и на исправном коммутаторе. Поэтому строгим доказательством именно одноадресной утечки (а не широковещания) служит перехват трафика, которым обмениваются два посторонних узла. В нашем эксперименте атакующий (192.168.1.1) являлся одной из сторон ICMP-обмена, поэтому для полной чистоты верификации рекомендуется отдельный сценарий с перехватом одноадресного трафика между двумя третьими узлами; дейтаграммы netbios-dgm в данной работе демонстрируют именно потенциал раскрытия служебной информации в широковещательном домене.

После очистки таблицы на порт включена защита port-security (рис. 6): режим access, максимум 1 MAC-адрес, sticky обучение и реакция shutdown при нарушении.

```
Switch#configure terminal
Enter configuration commands, one per line.  End with CNTL/Z.
Switch(config)#interface fa0/1
Switch(config-if)#switchport mode access
Switch(config-if)#switchport access vlan 1
Switch(config-if)#switchport port-security
Switch(config-if)#switchport port-security maximum 1
Switch(config-if)#switchport port-security mac-address sticky
Switch(config-if)#switchport port-security violation shutdown
Switch(config-if)#no shutdown
Switch(config-if)#end
```

Рисунок 6 — Настройка port-security на Cisco (maximum 1, sticky, violation shutdown)

При повторном запуске атаки с включённой защитой таблица во время атаки содержала лишь одну динамическую запись (всего 21 запись: 20 статических + 1 динамическая, рис. 7) — порт зафиксировал первый легитимный адрес и заблокировал поток подменных кадров. Переход в fail-open не произошёл.

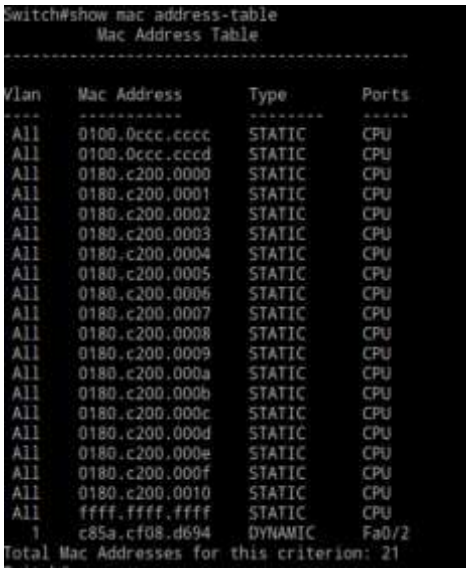


Рисунок 7 — Таблица MAC Cisco во время атаки при включённом port-security (всего 21)

Завершение цикла верификации.

Поскольку port-security с maximum 1 и violation shutdown не допускает заполнения CAM, режим fail-open структурно невозможен, а значит прекращается и лавинная рассылка чужого unicast. Следовательно, повторный перехват tcpdump на интерфейсе атакующего после включения защиты не должен содержать чужих одноадресных кадров; данный подтверждающий дамп рекомендуется как обязательный завершающий шаг цикла «атака → защита → повторная верификация».

2. Eltex MES.

Поведение без защиты аналогично Cisco: во время атаки таблица заполняется выученными (Learnt) адресами на порту fa 1/0/1 (рис. 8).

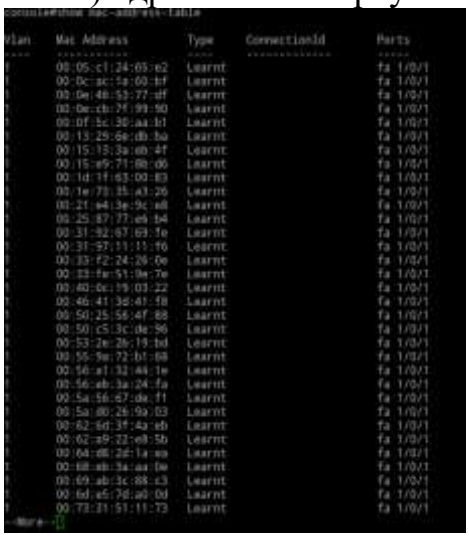


Рисунок 8 — Таблица MAC Eltex во время атаки без защиты (записи Learnt на fa 1/0/1)

Защита настроена аналогично port-security: режим access, port-security mac-limit 2, port-security enable, режим secure-delete-on-reset. При атаке защита срабатывает немедленно — система регистрирует превышение лимита обучения MAC и блокирует дальнейшее заполнение (рис. 9); таблица не переполняется.

Рисунок 9 — Срабатывание port-security на Eltex: «MAC learning limit exceeded»

3. MikroTik RouterOS 7.22.

Мост bridge1 (protocol-mode rstp, vlan-filtering=no) объединяет порты ether1 и ether2. До атаки таблица хостов содержала 4 записи (2 локальные адреса моста и 2 внешних). Во время атаки без защиты таблица заполняется сотнями динамических записей на ether1 (рис. 10), рост практически неограничен.

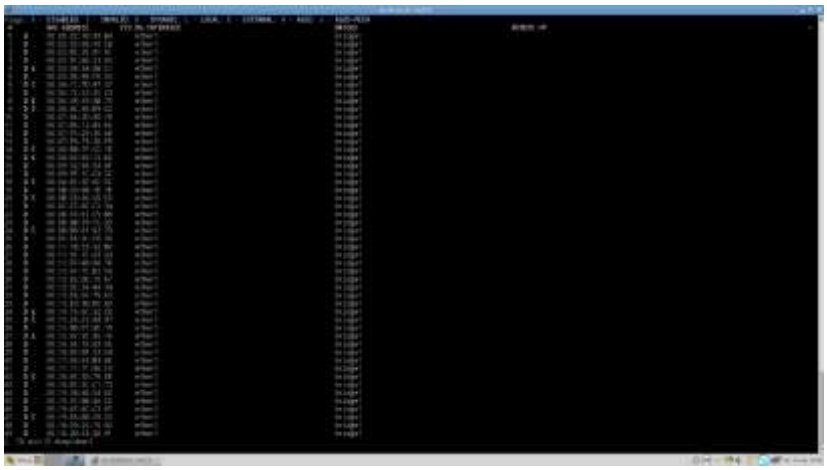


Рисунок 10 — Таблица хостов MikroTik во время атаки без защиты (лавинный рост записей)

Защита реализована набором bridge-механизмов (рис. 11): ageing-time=10s (ускоренное устаревание), max-learned-entries=1024 (ограничение размера таблицы), unknown-unicast-flood=no и unknown-multicast-flood=no на портах (запрет лавинной рассылки неизвестного трафика), horizon, а также bridge filter add chain=input action=drop на ether1/ether2.

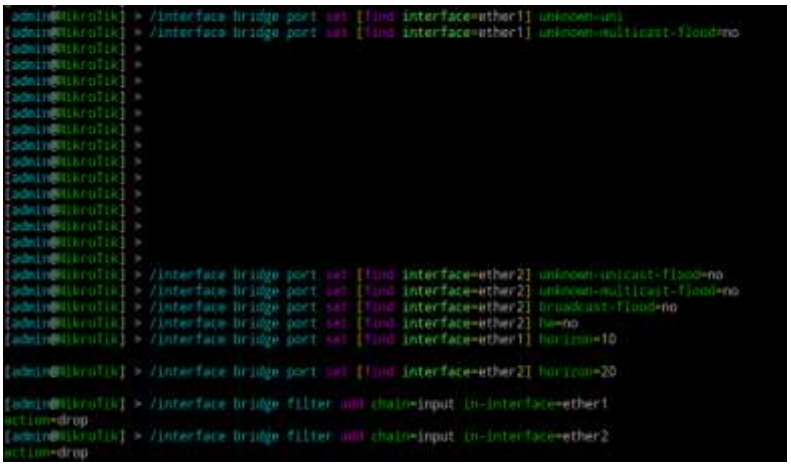


Рисунок 11 — Настройка защиты MikroTik (max-learned-entries, unknown-unicast-flood=no, bridge filter)

После включения защиты при работающей атаке счётчик /interface bridge host print count-only составил 1026 (рис. 12).

Рисунок 12 — Счётчик таблицы хостов MikroTik после защиты во время атаки: 1026

Интерпретация счётчика 1026.

Значение 1026 = 1024 (потолок max-learned-entries) + 2 локальные записи моста. Это означает, что таблица **достигла настроенного предела и насыщена «под завязку»**, однако в отличие от незащищённого случая её рост **ограничен** и не приводит к неконтролируемому исчерпанию памяти. Ключевую роль играет не сам предел, а параметр unknown-unicast-flood=no: даже при полностью заполненной таблице неизвестный одноадресный трафик не рассылается лавинно, поэтому переход в fail-open и утечка чужого unicast предотвращаются. Таким образом, на MikroTik таблица всё же заполняется до потолка (1024 подменных записи), но перехват не достигается.

4. Связность жертвы во время атаки.

Зафиксирована деградация связности: при отправке ICMP-эхо-запросов к узлу 192.168.1.2 во время атаки из 9 пакетов получен 1 ответ, потери составили **88,9 %** при RTT 1,538 мс. Это подтверждает, что MAC-флудинг наряду с утечкой вызывает выраженный DoS-эффект для легитимного обмена в широковещательном домене.

Таблица 2 — Сводные результаты: состояние таблицы коммутации и эффективность защиты

Показатель	Cisco 2960	Eltex MES	MikroTik 7.22
Записей до атаки	20 (статич.)	0 динамич.	4 (2 лок.+2 внеш.)
Во время атаки (без защиты)	заполнение до ≈8192 (fail-open)	лавинное заполнение	сотни → неогранич.

Показатель	Cisco 2960	Eltex MES	MikroTik 7.22
Во время атаки (защита вкл.)	1 динамич. (всего 21)	2 (лимит)	1026 (1024+2)
Механизм защиты	port-security max 1, sticky, shutdown	port-security mac-limit 2	max-learned-entries, unknown-unicast-flood=no
Реализация	аппаратная	аппаратная	программная
Fail-open предотвращён	**да**	**да**	да (флуд запрещён)
Таблица переполнена при защите	нет	нет	да, до потолка 1024

5. Нагрузка на процессор контрольной плоскости (Control Plane) во время атаки

Поскольку CAM-Table Overflow по своему механизму отнесён к классу отказа в обслуживании (T1499 «Endpoint Denial of Service», подтип исчерпания ресурсов), для прямого подтверждения факта исчерпания аппаратного ресурса дополнительно зафиксирована загрузка центрального процессора. Загрузка снималась в дыух состояниях: в покое (фоновый уровень) и во время атаки macof. В состоянии покоя все три платформы демонстрируют низкую и устойчивую загрузку процессора, что задаёт точку отсчёта для оценки нагрузочного эффекта атаки. Во время атаки картина качественно меняется. На Eltex и MikroTik загрузка процессора выходит на уровень насыщения (среднее 94,4 % и 97,4 % соответственно), на Cisco рост умеренный (среднее 16,6 %). Результаты представлены на таблицах 3 и 4.

Таблица 3 — Загрузка процессора в состоянии покоя

Устройство	5 сек.	1 мин.	5 мин.
Cisco 2960	5%	7%	5%
Eltex MES	4,4%	3,8%	4,5%
MikroTik 7.22	0%	0%	0%

Таблица 4 — Пиковые значения загрузки ЦП по итерациям (основная атака)

Итерация	Cisco 2960, %	Eltex MES, %	MikroTik 7.22, %
1	26	95	97
2	21	94	98
3	15	95	97
4	12	93	98
5	9	95	97

Итерация	Cisco 2960, %	Eltex MES, %	MikroTik 7.22, %
Среднее	16,6	94,4	97,4
Откл.	0,6	0,5	0,5

Анализ информации, полученной экспериментальным путем

Аппаратная и программная реализации.

Cisco 2960 и Eltex MES применяют аппаратный port-security: число MAC-адресов ограничивается непосредственно на порту, а превышение лимита детерминированно блокирует порт (Cisco — shutdown, Eltex — отказ в обучении). Это исключает заполнение CAM и переход в fail-open. MikroTik реализует защиту программно на уровне моста: max-learned-entries ограничивает размер таблицы в целом (а не по портам), unknown-unicast-flood=no запрещает лавинную рассылку, ageing-time ускоряет устаревание записей. Эффект достигается, но качественно иначе: таблица всё равно заполняется до потолка (счётчик 1026), а ограничение является общесистемным, без гранулярности «по порту».

Технический разбор механизма MikroTik.

Включённое в конфигурацию правило bridge filter add chain=input action=drop технически не эквивалентно port-security и не является корректной мерой против MAC-флудинга. В модели моста RouterOS цепочка input обрабатывает только кадры, адресованные самому мосту (управляющий трафик к устройству), а не транзитные пересылаемые кадры (для них предназначена цепочка forward). Поэтому данное правило не останавливает транзитный флуд, но при этом блокирует входящий управляющий трафик к мосту, ухудшая управляемость. Действительно работающими контрмерами в данной конфигурации являются max-learned-entries=1024 (ограничение роста таблицы) и unknown-unicast-flood=no (запрет fail-open-рассылки); именно последний параметр предотвращает утечку. Кроме того, в режиме моста RouterOS отсутствует полноценный аналог port-security с подсчётом MAC на конкретном порту, что является ограничением платформы.

Ограничения исследования.

Фиксировалось состояние таблицы и факт утечки качественно/количественно по дампам, без многократных серий и статистической оценки времени реакции. Строгая верификация одноадресной утечки (перехват трафика двух третьих узлов) и подтверждающий повторный дамп после защиты на Cisco намечены как обязательные шаги для полного цикла верификации.

Заключение

В ходе работы воспроизведена атака CAM-Table Overflow и проведено сравнение механизмов её нейтрализации на оборудовании трёх вендоров. Основные результаты:

1. Подтверждены механизм и последствия атаки: переполнение таблицы переводит коммутатор в fail-open, что вызывает утечку трафика (зафиксированы чужие кадры, включая netbios-dgm UDP/138) и деградацию связности жертвы — потеря ICMP 88,9 % (1 ответ из 9).
2. Cisco 2960 (port-security max 1, sticky, shutdown): во время атаки в таблице 1 динамическая запись (всего 21), fail-open предотвращён.
3. Eltex MES (port-security mac-limit 2): немедленное срабатывание ограничения, 2 записи, таблица не переполняется.
4. MikroTik 7.22 (max-learned-entries=1024, unknown-unicast-flood=no): счётчик 1026 = 1024 + 2 локальные; таблица заполняется до потолка, но утечка предотвращается запретом лавинной рассылки. Правило bridge filter chain=input action=drop технически не эквивалентно port-security.
5. Аппаратный port-security (Cisco, Eltex) превосходит программный механизм MikroTik по детерминированности и гранулярности (ограничение по порту против общесистемного потолка).

Таким образом, цель достигнута: выполнена практическая реализация атаки и защиты, получено количественное сравнение состояния таблицы коммутации трёх платформ.

Список литературы:

1. MITRE ATT&CK Framework. T1040: Network Sniffing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://attack.mitre.org/techniques/T1040/ (дата обращения: 10.06.2026).
2. MITRE ATT&CK Framework. T1499: Endpoint Denial of Service [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://attack.mitre.org/techniques/T1499/ (дата обращения: 10.06.2026).
3. Altunbasak, H. Securing Layer 2 in Local Area Networks / H. Altunbasak, S. Krasser, H. L. Owen, J. Grimminger, H.-P. Huth, J. Sokol // Networking – ICN 2005. Lecture Notes in Computer Science. – Springer, 2005. – Vol. 3421. – P. 699–706. – DOI: 10.1007/978-3-540-31957-3_79.
4. Yeung, K. H. Tools for Attacking Layer 2 Network Infrastructure / K. H. Yeung, D. Fung, K. Y. Wong // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (IMECS). – 2008. – Vol. II. – P. 1143–1148.
5. Network Working Group. RFC 1001, Protocol Standard for a NetBIOS Service on a TCP/UDP Transport: Concepts and Methods. – IETF, 1987. – 68 p.
6. Network Working Group. RFC 1002, Protocol Standard for a NetBIOS Service on a TCP/UDP Transport: Detailed Specifications. – IETF, 1987. – 85 p.
7. Cisco Systems. Catalyst 2960 Switch Software Configuration Guide. Configuring Port Security [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.cisco.com/c/en/us/support/switches/catalyst-2960-series-switches/ (дата обращения: 05.06.2026).
8. Eltex. Коммутаторы серии MES. Руководство по эксплуатации. Port Security [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.eltex-co.ru/ (дата обращения: 05.06.2026).

9. MikroTik. RouterOS – Bridging and Switching: Bridge Host Table, max-learned-entries, unknown-unicast-flood, Bridge Filter [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://help.mikrotik.com/docs/ (дата обращения: 05.06.2026).

10. Уймин, А. Г. Применение отечественного сетевого оборудования Eltex и EcoRouter в рамках специальности 09.02.06 «Сетевое и системное администрирование» / А. Г. Уймин, И. М. Толмачев // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2025. – № 11(628). – С. 58–62. – EDN DMHQJU.

11. ФСТЭК России. Методика оценки угроз безопасности информации (утв. 05.02.2021). – М., 2021. – 52 с.

12. ГОСТ Р 56546-2015. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Классификация уязвимостей информационных систем. – М.: Стандартинформ, 2016. – 18 с.

13. Банк данных угроз безопасности информации (БДУ) ФСТЭК России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://bdu.fstec.ru/ (дата обращения: 05.06.2026).

АРХИТЕКТУРА И ДИЗАЙН

УДК 721:69:79

Капустин Е. С., Башкиров В. И.
Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

МЕТОДЫ И ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВ ПАРКОВ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВИДОВ СПОРТА НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Статья посвящена исследованию методов формирования пространств парков экстремальных видов спорта на основе использования вторичных материалов в структуре городской среды. Выявление основных методов и принципов основано на анализе отечественного и зарубежного опыта применения вторичного сырья. Актуальность темы обусловлена двумя взаимосвязанными процессами. С одной стороны, архитектурно-строительный сектор испытывает нарастающее давление со стороны экологической и ресурсной повестки, что требует перехода от линейной модели потребления материалов к циркулярной. С другой стороны, современные города нуждаются в качественных, безопасных и социально значимых пространствах для неформальной физической активности молодежи. Работа направлена на преодоление разрыва между исследованиями в области устойчивого проектирования и практикой формирования специализированных спортивно-рекреационных пространств. Научная новизна работы состоит в разработке методической модели, в которой вторичные материалы рассматриваются не как декоративное или утилитарное дополнение, а как фактор функционально-планировочной структуры, конструктивного выбора и архитектурного образа экстремального парка.

Ключевые слова: вторичные материалы, общественные пространства, парки, экстремальные парки, скейт-парки, DIY, самодельные парки, деградированные территории

Историческое развитие темы исследования

Формирование общественных пространств, для активного отдыха, имеет длительную историю и тесно связано с развитием городской среды. На ранних этапах урбанизации рекреационные зоны представляли собой природные территории, адаптированные для прогулок и простых форм досуга. Их структура основывалась на природном ландшафте и минимальном вмешательстве человека, а используемые материалы имели естественное происхождение – дерево, камень, грунт.

С развитием индустриального общества в XIX–XX веках происходит качественное изменение подходов к формированию городской среды. Появляются парки как целенаправленно спроектированные пространства, включающие дорожную сеть, функциональные зоны и элементы

благоустройства. В этот период начинается активное использование индустриальных материалов – бетона, металла, асфальта, что связано с ростом строительных технологий и необходимостью создания долговечных конструкций.

Для экстремальных практик принципиально важно, что их генезис связан с присвоением уже существующей городской среды. Пользователи осваивали лестницы, перила, уступы, наклонные плоскости, пустующие участки и остаточные пространства городской ткани, превращая элементы повседневной инфраструктуры в функциональные фигуры движения. Лишь затем возникла потребность в специально спроектированных пространствах, где линии катания, уровни сложности и зоны наблюдения организованы целенаправленно.

Рис.1. Скейт-парк Лейквуд, Огайо, США, 1978-1982 гг.

Так во второй половине XX века формируется новая типология общественных пространств, ориентированных на активные виды досуга. В частности, в 1960–1970-х годах в США и Европе возникают первые скейт-парки, которые можно рассматривать как прототипы современных парков экстремальных видов спорта (Рис.1). Огромные бетонные конструкции не вписывались в строгие тенденции архитектуры тех лет, что привело к их повсеместному сносу. С середины 1980-х энтузиастам приходилось конструировать самодельные рейлы и споты, или осваивать пустые бассейны на задних дворах жилых домов. Следствием этого является появление культуры DIY-скейт-парков, то есть сделанных своими руками. Большинство из них были построены незаконно на неиспользуемых дорожных развязках, заброшенных дворах и забытых железнодорожных переходах. Поскольку финансирование

отсутствовало, многие из этих парков были созданы из подручных материалов, найденных на улицах города, что является изначальной предпосылкой к применению вторичных материалов в историческом контексте. Некоторые площадки закрылись органами правоохранительной власти, другие функционируют и по сей день, так как были признаны и легализованы в городе. Снимая в течении четырёх лет самодельные скейт-парки Ричард Гиллиган создал книгу DIY/Underground Skateparks, которая рассказывает о таких парках, как об архитектурном бунте, призванным обратить внимание на непримечательные или деградированные участки территорий городской среды.

К 1980–1990-м годам начинается этап институционализации экстремальных видов спорта. Появляются первые профессионально спроектированные скейт-парки, в которых используются бетон, металл и фанера. Пространственная структура таких объектов становится более сложной: формируются зоны различной сложности, элементы для выполнения трюков, маршруты движения. Архитектура начинает учитывать не только функциональность, но и сценарии использования пространства.

Этот переход от стихийного присвоения к профессиональному проектированию не отменил городской природы skate-культуры; напротив, он закрепил её как проектный принцип. Поэтому современный экстремальный парк должен сохранять читаемость «городской» логики, но при этом обеспечивать безопасность, управляемость потоков и нормативную корректность. [12; 26; 27; 41; 45]

Одновременно с этим усиливается внимание к вопросам экологии и рациональному использованию ресурсов. В конце XX – начале XXI века формируется концепция устойчивого развития, предполагающая снижение нагрузки на окружающую среду и повторное использование материалов [1; 5]. В материалах для строительной отрасли это означает не просто переработку отходов, а работу с компонентами жизненного цикла: разборкой, сортировкой, повторным введением в оборот, сокращением первичного сырья и проектированием с учётом последующего демонтажа. В архитектуре это приводит к появлению практик использования вторичных ресурсов, однако на начальном этапе они ограничиваются отдельными элементами – покрытиями, малой архитектурой и декоративными решениями. В следствии также появляются проекты, в которых переработанные пластик, металл и резина используются для создания конструкций и элементов благоустройства.

В контексте парков экстремальных видов спорта это выражается в применении переработанных материалов для создания ударопоглощающих покрытий, модульных конструкций и элементов оборудования. Например, переработанная резина используется для формирования безопасных поверхностей, а вторичный металл – для создания каркасов и конструктивных

елементов. Однако в большинстве случаев такие решения остаются на уровне отдельных компонентов и не формируют целостной пространственной системы.

Современный этап развития характеризуется поиском новых подходов к интеграции вторичных материалов в архитектурное проектирование. Возникает необходимость перехода от их фрагментарного использования к системному, при котором свойства материала определяют форму, конструкцию и организацию пространства. Такой подход предполагает изменение традиционной логики проектирования и формирование новой парадигмы, в которой материал становится активным участником формирования архитектурной среды.

Таким образом, исторический анализ темы демонстрирует переход от природных материалов к индустриальным, а затем к осознанному использованию вторичных ресурсов. Развитие общественных пространств и экстремальных парков непосредственно связано с эволюцией используемых материалов и технологий. При этом в области проектирования парков экстремальных видов спорта сохраняется разрыв между потенциалом вторичных материалов и уровнем их интеграции в пространственную структуру объектов. Это определяет необходимость дальнейших исследований, направленных на разработку методов формирования среды на основе вторичных материалов.

Отечественный и зарубежный опыт проектирования парков экстремальных видов спорта с применением вторичных материалов.

Формирование парков экстремальных видов спорта в мировой практике прошло путь от стихийных пространств до сложных специализированных объектов, интегрированных в городскую среду.

Зарубежная практика показывает, что экстремальные парки наиболее эффективны, когда воспринимаются как общественные пространства, а не как изолированные спортивные сооружения. Руководство Sport New Zealand прямо подчёркивает, что пространства подобного типа должны проектироваться как места планирования, финансирования, строительства и дальнейшей активации сообщества, а британские рекомендации по проектированию скейт-пространств указывают, что хороший экстрим парк обязан предусматривать места ожидания, наблюдения, отдыха, хранения вещей и качественное ландшафтное окружение. Международные рекомендации World Skate, в свою очередь, фиксируют двойное требование: соблюдение безопасности по национальным правилам и сохранение свободы проектировщика в создании уникальной композиции фигур. [26; 40; 41; 45]

В странах Европы и Северной Америки проектирование экстремальных парков развивается с учетом принципов устойчивого развития и интеграции в городскую инфраструктуру. Одним из ключевых направлений является создание многофункциональных пространств, сочетающих спортивные,

рекреационные и социальные функции. Такие объекты часто размещаются в деградированных или ранее неиспользуемых территориях, что позволяет активизировать городскую среду.

Рис.2. Скейт-парк Burnside, Портленд, штат Орегон, США.

Таким примером активизации городской среды является Портлендский скейт-парк Burnside, штат Орегон (Рис. 2). Одни из культовых скейт-парков, построенных в 1990-х годах под восточной частью моста Бернсайд через реку Уилламетт. Причиной расположению спота в этом месте является погода. В Портленде часто очень дождливо, к тому же место было очень отталкивающим из-за валяющегося мусора, слоёв пыли и подозрительных людей. Уровень преступности в этом районе был очень высок, поскольку рядом было пустынно, недалеко проходил поток грузовых поездов. Изначально скейт-парк был построен без разрешения, своими руками. Позже был легализован и стал частью городской структуры. Стараниями людей за 20 лет этот объект превратился из захолустья в один из известнейших спотов в мире. Примечательно то, что грунт для строительства форм брался с пустующего участка через дорогу, а вода для смешения цемента черпалась прямо из луж. Это наглядно показывает один из методов применения вторичного сырья на ранних этапах формирования фигур в пространстве скейт-парка.

Применение вторичного сырья выявлено также в анализе скейт-парка Dinero DIY, созданный на заброшенной территории фабрики по производству губной помады в Испании, городе Аррабаль-1 Пуэбло Картама. Этот парк является масштабным арт-проектом, состоящим из инсталляций на тему денег и роскоши. Цель проекта – побудить людей по-новому взглянуть на искусство и привнести красоту в непримечательное место (Рис. 3).

Рис.3. Самодельные фигуры скейт-парка Dinero DIY.

Для этой цели художники Lev Mclean и Eve Arslett превратили каждый спортивный снаряд в артобъект. Всё началось с трёх разделённых между собой бетонных плит, на которых раньше стоял завод по производству губной помады. После нескольких мучительных часов подметания и уборки камней и грязи, Лев, Ева и их команда начали строить парк из щебёнки, которую они нашли в пустыне. Каждую новую фигуру они начинают с предварительной зарисовки макета, раздумывая, каким образом они построят её основание. Учитывая, что некоторые фигуры являются неортодоксальными для катания на скейте, например, бутылка шампанского или скутер, перед тем, как закончить фигуру, они обкатывают её, чтобы убедиться в том, что она не развалится в тот же момент. Скейт-парк был разделён на три зоны.

Первая зона включает в себя дорогие бренды, такие как сумка Prada, с клинообразной биркой Plan B, грань-чемодан Louis Vuitton и ювелирная коробка от Tiffany. Вторая зона стала домом для знаменитых произведений искусств: кикеры с изображением “Мона Лизы”, “Крик” Эдварда Мунка и “Звёздная ночь” Ван Гога, дополненные связанными со скейтбордингом деталями. В третьей зоне располагается огромное колесо фортуны, создатели которого вдохновились Лас Вегасом.

Финансирование парка осуществлялась скейтерами, которые приложили руку над его созданием. Они постоянно роются по свалкам в поисках металлических отходов и полезного мусора, включая полупустые банки краски. Этот опыт прежде всего важен созданием пространства экстремальных парков не просто как набора спортивных элементов, а инсталляцией из артобъектов. Создатели парка считают, что таким образом творческий подход может оказывать огромное влияние при создании скейт-парков. Использование дизайнерами изобретательности и силы воображения позволят взглянуть на скейт-парки под другим углом.

В ряде случаев вторичные материалы становятся основой архитектурного образа, формируя визуальную идентичность пространства. В качестве такого примера выступает Резервуарный скейт-парк, возведённый в Австралии, городе

Мельбурн (Рис. 4). Когда-то он считался худшим парком, но в 2013 году его модернизировали, и теперь он входит в число лучших площадок Мельбурна. Модернизацией занималась компания Place и включила в себя множество переработанных материалов, которые можно найти на обычной улице города. Отмеченный наградами дизайн привлёк внимание к этому уличному скейт-парку со всего мира. Он был построен на месте старой баскетбольной и нетбольной площадок. Ключевой особенностью скейт-парка является наличие 23 фигур для трюков, модернизированных с помощью переработанных материалов. К сожалению, присутствуют и некоторые минусы, главные из них – не ровное бетонное покрытие, которое может порвать одежду и трещины, появляющиеся по всей территории парка. Определённо следует вывод, что за парком нужно следить, особенно скейтбордистам из-за небольшого диаметра колёс. Несмотря на это, данный опыт является хорошим примером интеграции вторичных материалов путём модернизации существующих площадок.

Рис.4. Резервуарный скейт-парк, Австралия, Мельбурн.

Рассматривая зарубежный опыт, следует выделить Португальский проект в городе Кашкайш (Рис. 5). Torre Plstik – это станция переработки пластика, размещённая при скейт-парке в районе Торри в старом судовом контейнере, расписанном местным художником Карлосом Стоком. Концепция подразумевает сбор пластиковых бутылок и крышек, упаковок от моющих средств и шампуней. Полученный после измельчения материал расплавляется в формах, тем самым обретая новую жизнь в виде полезных и долговечных предметов, например, скейтбордах, которые можно опробовать на территории скейт-парка. Создание одного скейтборда требует от 1,4 до 3,5 кг переработанного пластика, помогая снизить воздействие на окружающую среду. На территории парка проводятся мастер-классы, которые подразумевают практический опыт и совместную работу, также проводятся семинары в школах цель которых сделать переработку отходов доступной для большого числа людей. Данный пример демонстрирует, что внедрение вторичных материалов способно затронуть сервисные центры экстрим парка с целью привлечения новых пользователей к глобальной проблеме переработки отходов. Из этого

следует, что подобные пространства могут иметь не только развлекательный, но и просветительный характер.

Рис.5. Проект станции переработки пластика Torre Plstk на территории скейт-парка. Португалия, Кашкайш.

Исходя из анализа зарубежного опыта, следует промежуточный вывод, что применение вторичного сырья в площадках экстремальных видов спорта зародилось в DIY культуре зарубежных скейтбордистов из-за повсеместного сноса в 1980-х годах скейт-парков в США. Отсутствие финансирования и нелегальность строительства заставили искать энтузиастов искать другие альтернативы материалов для строительства. Идеи, заложенные при создании таких самодельных пространств, послужили основой для современных экстрим парков. Анализ зарубежного опыта показывает высокий уровень системности в проектировании таких пространств, включая использование инновационных материалов и технологий. При этом важно отметить, что даже в зарубежной практике применение вторичных материалов не всегда носит системный характер. Часто они используются как дополнение к традиционным материалам.

Отечественный опыт проектирования парков экстремальных видов спорта имеет более короткую историю и характеризуется иными особенностями. Активное развитие таких объектов началось в России в 2000-х годах, что связано с ростом популярности скейтбординга, BMX и других дисциплин. Большинство реализованных проектов ориентировано на типовые решения и использование традиционных материалов – бетона, металла и древесных композитов. Пространственная организация таких парков часто определяется функциональными требованиями и ограничениями бюджета, что приводит к стандартизации решений. Это не означает отсталость типологии, скорее, речь идёт о нормативной и технологической инерции: массовые проектные решения проще сертифицировать, стандартизировать и обслуживать.

Успешно реализованным примером подобного объекта является Казанский спортивный комплекс “Урам” (Рис. 6). Площадь «Урама» – 42 тысячи квадратных метров, и это самый большой в стране экстрим-парк. Проектированием и строительством занималась компания LegatoSportsArchitecture, основанная одним из лучших BMX-райдеров в стране

Василием Борисенко, – она специализируется на спортивных объектах и общественных пространствах. В разработке концепции также участвовали архитекторы бюро KOSMOS – авторы первого павильона музея Garage и визуального решения арт-пространства «ЭМА» в Москве.

Рис.6. Парк экстремальных видов спорта “Урам”, Россия, Казань.

Строительные работы начались в январе 2020 года. Почти половина команды проекта – призеры российских и мировых соревнований по скейтбордингу, даунхиллу, BMX Racing и другим экстремальным дисциплинам. Они тестировали и дорабатывали площадки экстрим-парка еще во время строительства: импровизация при воплощении проекта – кредо компании. Междисциплинарная синергия позволила создать пространство, отвечающее всем потребностям спортсменов. Оборудование разного уровня сложности позволяет и тренироваться новичкам, и профессионально готовиться к соревнованиям – вплоть до чемпионатов мира и Олимпийских игр. Первая очередь экстрим-парка – открытая часть площадью 20 тысяч квадратных метров, попасть в которую можно со стороны Кремлевской набережной и парка Горького. Она разделена на несколько зон.

Эйр-парк подойдет для самокатеров, роллеров и BMX-райдеров, которые хотят исполнять трюки в воздухе. В проектировании пространства участвовал чемпион России по BMX ИрекРизаев. Конструкцию сделали на собственном производстве LegatoSportsArchitecture в Казани. Она выполнена из обработанных гидрофобной жидкостью лиственничных балок, приподнятых над землей на пластиковой основе: так влажность и тающая вода не смогут повредить дерево. Для отработки воздушных трюков предусмотрели тренинг-зону с «рези» – матами, на которые можно безопасно падать.

Скейт-парк начинается с бетонной петли, которая играет роль входной группы и плавно перетекает в пул – зону, напоминающую бассейн, в которых в 1960−1970-е в Калифорнии и зарождался скейтбординг. Плавности форм элементов скейт-парка добивались при помощи технологии торкретирования бетона (его под высоким давлением сжатого воздуха напыляют на

армированный металл) и ручной затирки. Некоторые фигуры для катания в скейт-парке имеют двойной функционал – это одновременно малые архитектурные формы и антивандальные клумбы, которые планируют засадить многолетними растениями. Один из объектов, напоминающий по форме усеченный цилиндр, можно будет использовать в качестве сцены.

Плоская зона скейт-парка, или стрит-плаза, имитирует городское пространство – с перилами, скатами и лестницами. Боковые поверхности элементов здесь украшают мозаичные панно, которые складываются в единую картинку, – отсылка к 100-летию ТАССР, которое республика отмечает в этом году, и советскому монументальному искусству. Рядом с памп-треком возведен павильон с туалетом и душем.

Стритбольный парк, отвечающий требованиям FIBA 3×3, состоит из шести площадок для игры 3×3. При этом два больших поля можно объединить в полноценное пространство для игры в баскетбол. Чтобы защитить суставы игроков, здесь уложили покрытие хард с шестью мягкими слоями и резиновой подложкой для лучшей амортизации. Нестандартная расцветка стритбольных площадок – в оранжевых, лавандовых и серых оттенках – коррелирует с цветовым решением концепции развития набережной Казанки, разработанной студией OrchestraDesign. По задумке архитекторов, такое оформление поможет превратить стритбольный парк в популярный инстаграм-спот. Рядом с ним находится воркаут-площадка, а также зона паркура с разнообразными железобетонными фигурами, дополненными перилами, парапетами и перекладинами для трюков.

В экстрим-парке есть сразу два памп-трека – асфальтовые трассы с трамплинами, на которых можно разогнаться до 50 км/ч, не крутя педали велосипеда. Один подойдет для начинающих и детей, другой – для профессиональных и опытных спортсменов.

Использование вторичных материалов в отечественной практике носит ограниченный характер. Они применяются преимущественно в покрытиях или отдельных элементах благоустройства, но редко влияют на формирование общей структуры пространства. Это связано как с недостаточной разработанностью технологий переработки, так и с отсутствием нормативной базы, учитывающей особенности применения таких материалов.

Прогресс не стоит на месте и в 2022 году в Нижнекамске открывается экстрим-парк “Айда” (Рис.7). Новый экстрим-парк реализован в рамках Программы развития общественных пространств Республики Татарстан и федерального приоритетного проекта «Формирование комфортной городской среды». Создатели экстрим-парка «Айда» – архитектурно-строительная компания Legato Sports Architecture, известная благодаря реализации самого большого российского экстрим-парка УРАМ.

Рис.7. Парк экстремальных видов спорта “Айда”, Республика Татарстан, г. Нижнекамск.

Компания полностью взяла на себя разработку концепции и генплана, проектирование спортивных зон и строительство всех объектов. В начале проекта Legato разработала комплексный план долгосрочного развития всей территории Солнечной поляны.

Долгосрочный план развития территории включает в себя создание молодежной спортивной части, общегородской фестивальной зоны и детской зоны. На первом общественном обсуждении жители выбрали молодежную спортивную зону как приоритетную, поэтому первой очередью благоустройства территории стало строительство экстрим-парка «Айда». Общая площадь парка составляет 7225 м^2, а общая площадь экстремальных площадок – 4270 м^2.

Идея парка, в первую очередь, заключается в создании многофункционального городского пространства. В основе концепции парка лежат три основные идеи. Первая – это спорт. Суть экстрим-спорта – в развитии личных качеств райдеров. Скейтбординг и велодисциплины учат не бояться пробовать новое и четко понимать свой уровень катания, чтобы эффективно развивать свои навыки от любителя до профессионала.

Вторая идея – это искусство. Парк «Айда» – пространство для самовыражения. Оно открыто любым видам искусства, ведь в основе креативности всегда лежат вдохновение и эмоции, которые творчески переосмысляются и воплощаются в новой форме.

Третья идея – это экология. Это в первую очередь забота о том, что находится вокруг тебя. Чтобы улучшить окружающую среду, достаточно простых действий. Они начинаются с того, что человек с вниманием и заботой относится к своему пространству и осознает ту степень, в которой он может его улучшить.

Экстрим-парк «Айда» нацелен на экологическое просвещение, которое в промышленном городе становится еще более актуальным. Одна из задач парка «Айда» – создать тренд на бережное отношение к природе. Вторичная переработка – это самое простое и эффективное решение проблемы

пластикового загрязнения, поэтому уличная мебель в экстрим-парке «Айда» сделана из переработанных материалов (Рис. 8).

Рис.8. Мебель из переработанных материалов в экстрим-парке “Айда”.

Во-первых, такая мебель функциональна, а во-вторых, она показывает, что нефтепродукты, производимые в том числе в Нижнекамске, легко обретают вторую жизнь в общественных пространствах – для этого жителям достаточно отдавать на переработку крышки и флаконы.

Экологичная уличная мебель была создана в коллаборации Legato Sports Architecture с казанской мебельной компанией Qullar. В сборе материалов участвовали в том числе и жители Нижнекамска. Собранный пластик отсортировали по цветам, измельчили и провели термическую обработку, чтобы новый материал получился однородного цвета. В результате получилась красивая и яркая уличная мебель, которая помимо своей основной функции напоминает о том, что сортировать мусор и пользоваться вещами, созданию которых способствовал ты сам, – это легко.

Сравнительный анализ отечественного и зарубежного опыта позволяет выявить ключевые различия. Зарубежная практика демонстрирует более высокий уровень интеграции экстремальных парков в городскую среду, использование гибких планировочных решений и постепенное внедрение принципов устойчивого развития. Отечественная практика, в свою очередь, находится на этапе формирования и характеризуется преобладанием типовых решений.

Общей особенностью является отсутствие системного подхода к использованию вторичных материалов как формообразующего фактора. В большинстве случаев они рассматриваются как дополнительный ресурс, а не как основа проектирования.

Анализ отечественного и зарубежного опыта показывает, что, несмотря на развитие экстремальных парков как типологии общественных пространств, использование вторичных материалов остается фрагментарным. Отсутствие системного подхода к их применению ограничивает потенциал формирования

устойчивой и адаптивной среды. Это определяет необходимость разработки методов проектирования, в которых вторичные материалы выступают ключевым элементом формирования пространства.

Основные тенденции и факторы, влияющие на формирование экстремальных пространств.

Современный экстремальный парк развивается как многофункциональное общественное пространство. Он должен одновременно работать как тренировочная среда, место наблюдения, локальный общественный центр и безопасная сцена повседневной городской активности. Исследования подросткового развития и пользования парками показывают, что подобные пространства дают не только физическую нагрузку, но и формируют социальные связи, чувство принадлежности и опыт самостоятельного освоения среды. Поэтому в тексте статьи важно отказаться от узкого понимания парка как «спортивной площадки с фигурами». Более точным будет определение его как общественно-спортивного пространства открытого типа. [26; 41; 44; 45; 52] [19]

Формирование таких объектов зависит от ряда тенденций и факторов, связанных с развитием экстремальных видов спорта, потребностями пользователей, градостроительными и социальными аспектами.

групп факторов. Во-первых, это социальный фактор: рост запросов на индивидуализированные и неформальные формы активности. Во-вторых, градостроительный: дефицит свободных участков и одновременное наличие неосвоенных либо деградированных территорий. В-третьих, технологический: возможность моделировать сложные поверхности, композитные узлы и трансформируемые модули. В-четвёртых, нормативный: требования безопасности, доступности и эксплуатации. В-пятых, экологический: необходимость сокращать потребление первичного сырья. В-шестых, культурный: стремление формировать у пространства собственную идентичность, а не воспроизводить типовой набор фигур. [18; 21; 24; 26; 28; 41; 42] [20]

Из этого следует важный промежуточный вывод - экстремальный парк нового поколения должен проектироваться не как агрегат спортивных элементов, а как система сценариев движения, отдыха, наблюдения, обучения и событийного использования. Вторичный материал в такой системе становится оправданным только тогда, когда он включён в эту многослойную пространственную логику и распределён по зонам в соответствии со свойствами, а не по идеологическому принципу.

Требования к объектам, нормативная база и ограничения.

Проектирование экстремального парка опирается сразу на несколько уровней норм. На градостроительном уровне ключевыми являются СП 42.13330.2016 и СП 82.13330.2016, которые распространяются на планировку населённых пунктов и основные проектные решения по благоустройству. На

уровне спортивной типологии действует СП 332.1325800.2017, задающий требования к функциональным зонам, архитектурно-планировочным, конструктивным и инженерным решениям спортивных сооружений. На уровне безопасности skate-оборудования действует ГОСТ Р 54415-2011, устанавливающий требования к конструкции и испытаниям. На уровне доступности действует СП 59.13330.2020, распространяющийся на общественные здания и открытые для населения объекты с учётом МГН. Для открытых спортсооружений полезны также СП 31-115-2006 и, что особенно важно именно для темы диссертации, СП 31-115-2008(4), прямо адресованный экстремальным видам спорта и содержащий спортивно-функциональные параметры и требования к размерам площадок и сооружений. [1–5; 21] [22]

Нормативная логика означает, что наиболее нагруженные зоны объекта – катальные плоскости, кромки, линии приземления, переходы радиусов, опорные элементы под динамическими нагрузками – не могут проектироваться на основе лозунга о вторичности материала как таковой. Здесь действует требование предсказуемости механики, стабильности геометрии, отсутствия травмоопасных дефектов, контролируемого сцепления и обслуживания поверхности. Именно поэтому в диссертации необходимо прямо зафиксировать: материаловая политика экстремального парка должна быть гибридной. Этот тезис не ослабляет экологическую часть работы, а напротив, делает её профессионально убедительной. [5; 7; 18; 24; 28] [23]

Функциональная структура современного экстремального парка должна включать несколько взаимосвязанных слоёв. Первый слой – активное ядро катания. В него входят стрит-зона, транзитные переходы, элементы flow-траекторий, площадки начального уровня и участки повышенной сложности. Второй слой – подготовительно-сервисный: входные группы, места ожидания, хранения, ремонта, санитарный блок, навигация, освещение и техобслуживание. Третий слой – общественный: трибуны, террасы, места наблюдения, зоны тихого пребывания, озеленённые карманы и событийные площадки. Четвёртый слой – буферный: безопасные отступы, разделение потоков, шумозащитные зелёные полосы, эвакуационные и сервисные проезды. Именно такая многослойность отличает актуальный парк от примитивной «площадки с фигурами». [14; 18; 21; 41; 45; 52; 53] [24]

Важнейшим проектным понятием здесь является линия движения. Фигура не существует сама по себе: она осмысленна только внутри последовательности разгон – вход – приём – выкат – переход на следующую траекторию. Поэтому функционально-планировочная схема должна строиться не от перечня элементов, а от конфигурации возможных линий разных уровней сложности. Для новичка нужна короткая замкнутая траектория с хорошей обзорностью и минимальной конфликтностью. Для опытного пользователя – вариативная сеть линий с возможностью комбинировать трюки и выбирать темп движения. Для

сопровождающих и зрителей – внешняя кольцевая пешеходная логика без пересечения с опасными зонами. [18; 21; 40; 41] [25]

Принципы и методы проектирования экстремальных парков на основе вторичных материалов.

Ключевой методический тезис диссертации состоит в том, что вторичные материалы должны распределяться по объекту дифференцированно. Вторичный бетон и переработанные минеральные фракции разумно использовать в подосновах, стабилизации грунта, габионах, подпорных элементах, части массивных ландшафтных форм, фундаментах малых архитектурных форм, заполнении локальных амфитеатральных бортов и мощении второстепенных зон. Современные обзоры по recycled aggregate concrete и отчёты Европейского исследовательского центра показывают, что recycled aggregates перспективны, но их механические и долговечностные характеристики зависят от состава фракции, доли налипшего старого раствора, водопоглощения и требований к зоне применения. Из этого следует практический вывод: вторичный бетон особенно уместен там, где возможно лабораторно контролировать состав и где допустим более консервативный коэффициент надёжности, тогда как для идеальной катальной поверхности решение должно приниматься только после подтверждённых испытаний. [24; 28; 29; 61] [26]

Вторичная сталь и повторно используемый прокат целесообразны для рейлов, коупинг-элементов, каркасов навесов, опор освещения, ограждений, ремонтных стоек, рам сервисных павильонов и модульных конструкций паркур-зоны. Однако каждое такое решение предполагает очистку, дефектоскопию, антикоррозионную защиту и компенсацию износа в узлах контакта. Это означает, что повторно используемый металл в экстремальном парке допустим не как «сырой лом», а как материал после инженерной доводки до безопасного эксплуатационного состояния. [7; 18; 24; 29] [27]

Переработанный пластик и ДПК, уместны прежде всего в тех зонах, где требуется атмосферостойкость, малая масса, ремонтопригодность и при этом отсутствуют ударные фронтальные нагрузки от колёс и жёсткого приземления. Это скамьи, лежаки, террасы ожидания, настилы обзорных площадок, панели навигации, контейнеры для раздельного сбора, декоративно-защитные экраны и часть фасадных элементов сервисного павильона. Исследования долговечности recycled WPC показывают, что после осадков и перепадов температур механические характеристики могут снижаться, причём у композитов на вторичном пластике это выражено сильнее, чем у композитов на первичном полимере. Следовательно, важно прямо указать их корректную область применения: не в зоне наиболее жёсткого спортивного удара, а в зоне обслуживающей и общественной инфраструктуры. [29; 38; 50; 51] [28]

Вторичная резина требует особенно взвешенного подхода. Европейские и американские исследования показывают, что такая среда не должна

безоговорочно романтизироваться: её применение требует контроля состава, сценария контакта, пылеобразования, выноса частиц и режима эксплуатации. Поэтому логично использовать переработанную резину в строго локальных амортизирующих участках – например, около паркур-элементов, тренировочных зон начального уровня, сервисных маршрутов и буферных покрытий. [7; 16; 38; 50] [29]

Из перечисленного вытекают основные принципы проектирования. Первый принцип – материально-обусловленное формообразование: форма возникает из свойств и допустимых радиусов, толщин и способов соединения материала. Второй – функциональная интеграция материала: каждый тип вторичного ресурса назначается в ту зону, где его свойства работают на безопасность и удобство. Третий – модульность и адаптивность: часть объекта должна быть готова к замене или пересборке без разрушения всей системы. Четвёртый – гибридность: экологический эффект достигается не отказом от первичного материала, а точным перераспределением ролей между материалами. Пятый – обратимость и ремонтопригодность. Шестой – образовательная наглядность среды, когда сами элементы парка демонстрируют логику повторного использования и тем самым превращают объект в площадку экологической коммуникации.

Методическая модель проектирования и система применения вторичных материалов в проекте парка экстремальных видов спорта.

Для данного проекта оптимальна трёхступенчатая методика. На первой стадии выполняется разбор существующих аварийных элементов с сортировкой материалов, полученных в результате их переработки.

Бетон и минеральный лом дробятся и распределяются по фракциям, стальной прокат проходит сортировку на пригодный к повторному использованию и направляемый на переплавку, пригодные кирпичные и каменные элементы резервируются для габионов, низких подпорных стенок и ландшафтных вставок. Уже на этой стадии закладывается материальный паспорт объекта. [24; 29; 38] [42]

На второй стадии формируется несущая и планировочная основа. Вторичный бетон используется в подосновах дорожек, площадок, части подпорных конструкций и ландшафтных террас. Повторно используемая сталь идёт на рейлы, каркасы навесов, ремонтные стойки, опоры вывесок и модули паркур-зоны. Переработанный пластик и ДПК применяются в настилах смотровых террас, мебели, урнах, навигации и образовательных модулях, рассказывающих о цикле материала. Переработанная резина концентрируется только в зонах, где нужен контролируемый амортизирующий эффект без постоянной высокоскоростной колёсной нагрузки. Это и есть та самая дифференцированная материаловая стратегия.[43]

На третьей стадии объект получает общественную и образовательную надстройку. В среде появляются демонстрационные маркеры происхождения материалов, модульный павильон ремонта досок и самокатов, площадка для локальных воркшопов по переработке пластика, а также визуальные схемы, показывающие, какие элементы сделаны из чего. Это необходимо не ради иллюстративности, а ради завершения концепции: парк должен не только использовать вторичный материал, но и делать понятным сам принцип вторичного цикла для пользователя. В этом случае объект перестаёт быть просто «местом катания» и становится средой повседневного экологического просвещения. [24; 28; 38; 39] [44]

Заключение.

В ходе исследования разработана методическая модель формирования пространств парков экстремальных видов спорта на основе использования вторичных материалов. Установлено, что тема проектирования экстремальных парков на основе вторичных материалов имеет одновременно экологическую, типологическую и социальную актуальность. Она отвечает и вызовам ресурсной повестки строительства, и запросу городов на общественные пространства неформальной физической активности.

Выявлено, что современный экстремальный парк должен рассматриваться как общественно-спортивное пространство, а не как набор изолированных фигур. Его качество определяется не только конфигурацией катальных элементов, но и инфраструктурой ожидания, наблюдения, отдыха, безопасности, освещения, санитарного обслуживания и общественной коммуникации. Доказано, что существующая практика применения вторичных материалов в объектах данного типа носит по преимуществу фрагментарный характер. Вторсырьё чаще участвует в мебели, покрытиях и отдельных акцентных объектах, но редко определяет логику всего пространства. Именно этот пробел и образует предмет научного исследования.

Обосновано, что для экстремального парка наиболее профессионально корректной является гибридная, а не тотальная модель использования вторичных материалов. Вторичный бетон, вторичная сталь, переработанный пластик и переработанная резина должны получать разные проектные назначения в зависимости от механики нагрузки, требований безопасности и условий эксплуатации. Сформулированы основные принципы проектирования: материально-обусловленное формообразование, функциональная интеграция материалов, модульность и адаптивность, гибридность конструктивных решений, обратимость и ремонтопригодность, а также образовательная наглядность среды.

Показано, что деградированные и постиндустриальные территории обладают высоким потенциалом для размещения экстремальных парков и общественно-спортивных пространств, поскольку позволяют сочетать

редевелопмент, социалную активизацию территории и повторное включение уже существующего материального запаса в новый жизненный цикл.

Практическая ценность исследования состоит в том, что предложенная методическая модель применима не только к экстремальным паркам, но и к другим типам открытых общественных пространств, где требуется совместить устойчивость, программную насыщенность, проектную выразительность и экономику повторного использования материалов.

Список литературы:

1. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений // Минстрой России, 2016. – 134 с.

2. СП 82.13330.2016. Благоустройство территорий // Минстрой России, 2017. – 28 с.

3. СП 332.1325800.2017. Спортивные сооружения. Правила проектирования // Минстрой России, 2017. – 119 с.

4. ГОСТ Р 54415-2011. Оборудование для скейт-площадок. Безопасность конструкций и методы испытаний. Общие требования // Стандартинформ, 2011. – 19 с.

5. СП 59.13330.2020. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения // Минстрой России, 2020. – 65 с.

6. СП 31-115-2006. Открытые плоскостные физкультурно-спортивные сооружения // Росспорт, 2006. – 150 с.

7. СП 31-115-2008(4). Открытые физкультурно-спортивные сооружения. Часть 4. Экстремальные виды спорта // Росспорт, 2008. – 54 с.

8. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. M. P., Hultink E. J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 143. – P. 757–768. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048

9. Addis W. Building with Reclaimed Components and Materials: A Design Handbook for Reuse and Recycling // Earthscan, 2006. – 208 p.

10. Gilligan R. DIY/Underground Skateparks // Prestel, 2014. – 160 p.

11. Gehl J. Cities for People // Island Press, 2010. – 269 p.

12. Skatepark Planning and Design Guide [Электронный ресурс] // Sport New Zealand. – URL: https://sportnz.org.nz/resources/skatepark-planning-and-design-guide/ (дата обращения: 04.07.26).

13. Skatepark facility certification rules // World Skate, 2021.

14. Pacheco-Torgal F., Tam V. W. Y., Labrincha J. A., Ding Y., de Brito J. Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste // Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. – 646 p. DOI: 10.1533/9780857096906

УДК 711.5:712.4

Кожевникова Ю. Б.
Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, Мытищи, Россия

БОРЬБА ЗА БЕЗОПАСНОСТЬ ВО ДВОРЕ ЖИЛОЙ ЗОНЫ. (ПЕШЕХОДНЫЕ СЦЕНАРИИ И ТРАЕКТОРИИ)

Аннотация: статья посвящена проблеме обеспечения безопасности в дворовых пространствах жилых зон в условиях плотной городской застройки. Актуальность исследования обусловлена всё более частым использованием внутридворовых территорий в качестве транзитных коридоров, где интересы пешеходов вступают в конфликт с парковочной инфраструктурой и движением. Цель работы - выявление ключевых факторов дискомфорта и формирование практических рекомендаций по их устранению средствами ландшафтной архитектуры. Методика базируется на классификации территорий, маршрутно-визуальном анализе 15 кварталов и аналитическом обосновании ландшафтно-архитектурных решений. В результате исследования выявлено пять наиболее значимых факторов дискомфорта, среди которых системная нехватка уличной мебели (15,9% от всех выявленных случаев), однотипность среды (14,8%) и нереализованный потенциал озеленения (11,4%). Установлено, что 21,2% проблем связаны с несоблюдением нормативных требований СП 59.13330.2020 и чрезмерной эксплуатацией дворов как транзитных путей. Обосновано, что отсутствие безопасности на дворовой территории часто носит «мнимый» характер и вызывается несоблюдением иерархии пространств. Предложены четыре группы практических мер: зонирование через мощение и озеленение, внедрение малых архитектурных форм, использование групповых посадок для создания приватных микрозон и организация контрастных пешеходных переходов. Сделан вывод о возможности использования благоустройства как инструмента снижения социальной напряжённости в плотной городской среде.
Ключевые слова: дворовая территория, жилая зона, безопасность пешеходов, факторы дискомфорта, пешеходные траектории, уличная мебель, транзитные коридоры, мнимая опасность.

Введение

Современный жилой двор в условиях плотной городской застройки давно перестал быть закрытым оазисом приватности. Сегодня дворовое пространство все чаще выступает в роли транзитного коридора, где интересы пешехода конкурируют с инфраструктурой парковки и оживленным движением. Актуальность данного исследования заключается в необходимости переосмысления двора как ландшафтного объекта, способного обеспечить психофизический комфорт. Цель работы заключается в выявлении ключевых факторов дискомфорта и предложить реальные практические меры для их устранения.

В современных российских городах двор нередко выполняет сразу несколько наложенных друг на друга функций: это и пространство повседневного быта жителей, и транзитная зона для сокращения пути между улицами, и стояночная площадка для автомобилей, и место, куда вынесены детские и спортивные площадки в отсутствие полноценных парковых территорий шаговой доступности. Такое многослойное функциональное наполнение при ограниченной площади и недостатке ландшафтно-архитектурных элементов порождает интенсивную конкуренцию сценариев использования. Результатом становится рост конфликтов между тихим отдыхом и активной игрой, между безопасностью детей и необходимостью проезда спецтехники, между интересами автовладельцев и пешеходов. В этих условиях особенно остро встаёт вопрос о том, какие именно пространственные и планировочные решения усиливают дискомфорт, а какие, напротив, способны смягчить напряжение и вернуть двору роль базовой повседневной рекреационной среды.

Методика исследования

1. Классификация и отбор территорий.

Формирование выборки районов и кварталов в них для анализа. Необходимо понять, как тип застройки коррелирует с качеством среды. Как высокая плотность застройки в сочетании с отсутствием ландшафтного зонирования ведет к росту стресса у жителей. Доступность и соразмерность среды являются фундаментальными условиями комфорта [2]. Дополнительно важна образность городской среды, связанная с её читаемостью, наличием чётких ориентиров и структурой восприятия маршрутов, узлов и границ, что подчёркивается в классических исследованиях городской морфологии [6].

При классификации территорий учитывались не только формальные градостроительные параметры (этажность, тип застройки, период формирования квартала), но и характер включённости двора в более широкий городской контекст. Фиксировались наличие и качество связей с уличной сетью, степень визуальной открытости или, напротив, изолированности дворового пространства, насыщенность его объектами социальной инфраструктуры (детские сады, школы, поликлиники, объекты повседневного сервиса). Важно было определить, насколько двор функционирует как автономное пространство для жителей конкретного дома или группы домов и насколько он открыт для внешних пользователей, использующих его как кратчайший путь или место временной остановки.

Связь между типом застройки и качеством среды заключается в том, что плотная, смешанная, периметральная или квартальная застройка умеренной (3-6) этажности коррелирует с высоким качеством среды благодаря пешеходной доступности и социальному контролю. Тогда как монофункциональная, разреженная микрорайонная или излишне высотная точечная застройка

коррелирует с низким качеством среды из-за зависимости от автомобиля, дискомфортного масштаба и дефицита общественных пространств.

Сочетание высокой плотности застройки и отсутствия ландшафтного зонирования ведёт к росту стресса у жителей, потому что плотность порождает избыток шумов, визуальных стимулов и социальных контактов, а отсутствие зонирования, то есть функционально разделённых и пространственно обособленных зелёных буферов (тихих зон, акустических экранов, приватных площадок), лишает человека возможности фильтровать раздражители, контролировать дистанцию с другими людьми и восстанавливать внимание в среде с разной степенью уединения [5].

Для сбора данных были отобраны 15 кварталов в районах с разным периодом застройки и озелененностью не менее 25%.

Перед выездом проведен картографический анализ территорий. Кварталы разделены на типы объектов ЛА.

Картографический анализ включал сопоставление официальных планировочных решений с фактическим использованием территории. На схемах отмечались существующие зелёные насаждения, площадки различного функционального назначения, транспортные проезды, пешеходные связи, а также участки, потенциально пригодные для размещения дополнительных элементов благоустройства. Особое внимание уделялось выявлению «пустых» пространств - фрагментов дворов, которые фактически не используются жителями. Эти зоны рассматривались как потенциальный ресурс для повышения функционального качества двора.

2. Маршрутно-визуальный анализ.

Выявление факторов дискомфорта через личное восприятие. Данным анализом можно получить ответ на вопрос: какие характеристики среды вызывают у человека чувство небезопасности?

При выявлении «точек дискомфорта» проводилась их фотофиксация, а координаты точек отмечались на карте с помощью геолокации, т.е. точки обзора, угол обзора для оценки территории и достаточная площадь застройки для понимания градостроительной обстановки [7].

В точках дискомфорта отмечались не только пространственные параметры (ширина прохода, наличие барьеров, визуальные преграды), но и поведенческие маркеры: ускорение шага, избегание определённых участков, вынужденные обходы припаркованных автомобилей, попытки использовать импровизированные места для сидения.

Создание перечня факторов дискомфорта.

Фактором дискомфорта является субъективно фиксируемая характеристика городского пространства, которая снижает качество жизни жителей в жилой зоне и воспринимается ими как неудобство, раздражение, опасность или негативное переживание. Подобное понимание факторов

дискомфорта соотносится с комплексным подходом к оценке общественных пространств, где учитываются морфологические, социальные, визуальные и перцептивные параметры городской среды [9].

При формировании перечня факторов дискомфорта учитывалось, что один и тот же фрагмент среды может вызывать разные реакции у различных групп пользователей. Например, открытое, хорошо просматриваемое пространство может восприниматься как безопасное в вечернее время, но одновременно вызывать ощущение избыточной экспонированности и отсутствия приватности у людей, предпочитающих более укромные места для отдыха. Аналогично, насыщенная игровыми элементами детская площадка может быть позитивно оценена родителями с маленькими детьми, но создавать фон шума и беспокойства для пожилых жителей. Поэтому каждый фактор описывался не только через пространственный признак (отсутствие скамеек, однотипность мощения, близость проезжей части), но и через тип преобладающей эмоциональной реакции (усталость, тревога, раздражение, скука, чувство небезопасности).

3. Аналитическое обоснование ландшафтно-архитектурных решений.

Проводился поиск первопричин выявленных проблем. Определено какое воздействие, оказанное на предмет, привело к именно такому настоящему его виду. Причинами были ошибки в проектировании, историческая застройка, аварийные проезды [4]. При интерпретации выявленных ситуаций использовался подход, близкий к концепции типовых проектных «шаблонов» и антишаблонов, где повторяющиеся конфигурации среды соотносятся с устойчивыми сценариями поведения и качеством повседневного опыта жителей [1].

На этапе аналитического обоснования особое внимание уделялось тому, что в реальных условиях каждая зафиксированная ситуация представляет собой результат наложения нескольких слоёв решений, принятых в разное время и разными субъектами – проектировщиками, эксплуатирующими организациями, городскими службами, самими жителями.

Табличная форма обобщения позволила выстроить наглядные связи между типом территории, конфигурацией застройки, доминирующими факторами дискомфорта и их первопричинами. Для каждого фрагмента фиксировались не только основные характеристики (тип двора, период формирования, наличие примыкающих учреждений, степень озеленения), но и контекстные параметры – интенсивность пешеходного и транспортного движения, наличие визуальных доминант, степень просматриваемости пространства из окон. В отдельной графе формулировались «быстрые» рекомендации – те минимальные вмешательства, которые теоретически могли быть реализованы без сложных согласовательных процедур и значительных финансовых затрат. Это могли быть, например, установка одной-двух скамеек в

наиболее востребованных местах, корректировка схемы парковки для высвобождения небольших рекреационных площадок, локальное озеленение с использованием кустарников как визуальных экранов, нанесение контрастной разметки для выделения пешеходных переходов внутри двора.

Построение логических цепочек выполнялось по принципу «от ощущения к решению»: от субъективно фиксируемого дискомфорта – к выявленному фактору, далее – к пространственному признаку, затем – к гипотетической первопричине и, наконец, к возможному нормативному или проектному обоснованию. Например, ощущение опасности из-за близости проезжей части связывалось с фактором смешения траекторий пешеходов и СИМ, далее – с отсутствием бордюрного разделения и буферной полосы озеленения, что, в свою очередь, могло быть следствием решения максимально приблизить парковку к подъездам. На следующем уровне анализировалось, было ли это решение продиктовано нормативными требованиями (например, по расстоянию от парковки до фасада) или, напротив, явилось результатом опрощённого подхода к проектированию. Такой поэтапный разбор показывал, в какой точке цепочки потенциально можно вмешаться с минимальными издержками и наибольшим эффектом – изменить схему движения, скорректировать расположение парковочных мест, добавить визуальное и физическое разграничение.

В ряде случаев логическая цепочка выводила к системным причинам, выходящим за рамки отдельного двора: к общему дефициту финансирования работ по благоустройству, приоритету краткосрочных решений, ориентированных на эксплуатацию, а не на качество среды, отсутствию межведомственной координации между структурами, отвечающими за дороги, озеленение, социальную инфраструктуру. В подобных ситуациях «быстрые» рекомендации дополнялись принципиальными замечаниями о необходимости изменения подходов к проектированию дворовых территорий на уровне муниципальных программ. Тем не менее даже при наличии системных ограничений удавалось выделить точечные меры, которые могут быть реализованы силами управляющих компаний или инициативных групп жителей – установка дополнительных элементов уличной мебели, организация элементарного озеленения, упорядочение стихийного транзита через двор с помощью направляющего мощения.

Результаты исследования

Анализ 15 выявленных факторов дискомфорта в дворовых зонах позволил выявить какие факторы создают ощущение отсутствия безопасности.

Наиболее часто встречаемые факторы:

- Отсутствие возможности для отдыха (15,9%): системная нехватка уличной мебели и скамей превращает двор в пространство, не организованное для остановки, и вынуждает идти дальше.

- Однотипность среды (14,8%): отсутствие элементов малых архитектурных форм (МАФ) делает дворовое пространство монотонным и неуютным.

- Нереализованный потенциал озеленения (11,4%): наличие озелененного пространства при отсутствии его качественного наполнения.

Совокупность этих трёх факторов формирует своеобразный «треугольник дискомфорта», в котором телесная усталость от невозможности присесть накладывается на эмоциональное истощение от однообразной визуальной среды и разочарование от нереализованных ожиданий, связанных с присутствием зелёных насаждений. Житель, попадая в подобный двор, испытывает одновременно физическое и сенсорное перенапряжение: ему негде комфортно остановиться, пространство не предлагает интересных точек притяжения взгляда, а имеющееся озеленение не обеспечивает ни тени, ни уединения, ни разнообразия впечатлений. В результате даже короткое пребывание в таком дворе может восприниматься как утомительное, а длительное – как нежелательное.

Ключевой первопричиной 21,2% всех выявленных проблем является несоблюдение норм СП 59.13330.2020 и чрезмерная эксплуатация дворов как транзитных путей. Ощущение опасности усиливается из-за смешения траекторий пешеходов и СИМ, 9,1% частоты возникновения факторов, что напрямую связано с отсутствием физического разделения зон движения. Исследования уличных пространств показывают, что интенсивность транспортного движения и отсутствие приоритета для пешехода прямо коррелируют с ростом воспринимаемого стресса и снижением степени «обжитости» улиц [8].

Смешение траекторий пешеходов и средств индивидуальной мобильности, а также внутридворового автотранспорта проявляется не только в объективной опасности столкновения, но и в постоянном чувстве настороженности, которое сопровождает движение по двору. Пешеход вынужден всё время контролировать обстановку: оглядываться, прислушиваться к шуму двигателя или звуку приближающегося электросамоката, подстраиваться под маневры машин, идущих задним ходом. Это состояние повышенной бдительности препятствует возникновению ощущения защищённости, необходимого для восстановления психофизиологических ресурсов. Особенно уязвимыми в этих условиях оказываются дети и пожилые люди, чья реакция на быстро меняющуюся обстановку ограничена. Для них дворовая территория, вместо того чтобы быть безопасной зоной освоения внешнего мира, превращается в источник дополнительного стресса.

Чрезмерная эксплуатация дворов как транзитных путей усиливает этот эффект. Там, где двор используется не только его жителями, но и внешними

пользователями как кратчайший путь между улицами, остановками или объектами торговли, нагрузка на пространство многократно возрастает.

Выводы и обсуждение

Исследование подтвердило гипотезу, что отсутствие безопасности на дворовой территории часто носит «мнимый» характер, вызванный несоблюдением иерархии пространств. Житель может чувствовать угрозу там, где планировка создаёт конфликт траекторий движения либо же где площадки рекреации для тихого отдыха не обеспечивают психофизический комфорт.

Понятие «мнимой» небезопасности не отрицает существование реальных угроз, но подчёркивает, что значительная часть тревоги и напряжения формируется за счёт того, как организовано и «прочитывается» пространство. Если иерархия зон – от более открытых и динамичных к более защищённым и спокойным – не проявлена на уровне планировочных решений и визуальных сигналов, то у человека не возникает ощущения предсказуемости среды. В результате даже формально безопасные участки двора могут восприниматься как потенциально опасные, особенно в условиях плохой освещённости, отсутствия чётких границ между пешеходной и транспортной зонами, избыточной просматриваемости или, напротив, наличия глухих углов. Исследование показывает, что восприятие безопасности во многом связано с возможностью быстро идентифицировать своё положение в структуре двора.

Для здоровых отношений в обществе необходимы еще условия для здорового формирования личности каждого человека (воспитательное воздействие) и возможность временного уединения людей, а также снижение уровня агрессии каждого конкретного человека, возникающей в ходе общественных отношений и при контакте с техносферой [3]. Значение визуального контакта с зелёной средой и качественно оформленными открытыми пространствами для восстановления психофизиологического состояния подтверждается рядом эмпирических исследований, показывающих влияние видов на природные элементы на скорость восстановления и снижение уровня стресса [10].

Эмпирические исследования, на которые опирается работа, показывают, что даже кратковременное пребывание в пространстве, где доминируют природные элементы, способствует снижению уровня физиологических маркеров стресса, нормализации частоты сердечных сокращений и смягчению негативных эмоциональных состояний. Для дворовых территорий это означает, что качественно организованное озеленение способно компенсировать часть негативного воздействия городской среды без необходимости выезда в удалённые зелёные зоны или крупные парки.

Рекомендации по оптимизации.

1. Зонирование через мощение и озеленение. Использование различных типов покрытий для визуального отделения пешеходной зоны от

проезда. Этот способ является самым быстрым путем к повышению ощущения безопасности.

2. Внедрение дополнительных МАФ в виде уличной мебели и скамей для отдыха.

3. Использование групповых посадок для снижения «избыточной просматриваемости», что создает приватные микрозоны. Установка модулей озеленения не только для отдыха, но и как физических преград для случайного заезда автомобилей.

4. Создание контрастных по цвету и фактуре пешеходных переходов во дворе, заставляющих водителей снижать скорость.

Вопросы для дальнейших исследований остаются открытыми в части управления трафиком и влияния освещенности в ночные часы на устранение чувства «мнимой» опасности. Данные выводы позволяют рассматривать благоустройство как инструмент снижения социальной напряженности в плотной городской среде.

Список литературы:

1. Язык шаблонов: города, здания, строительство / Кристофер Александер [и др.]; пер. с англ. И. Сыровой. – Москва: Изд-во Студии Артемия Лебедева, 2014. – 1093 с.

2. Гейл Я. Города для людей / Ян Гейл; [пер. с англ. А. Токтонов]. – Москва: Концерн «Крост», 2012. – 263 с. EDN: QNQBIP

3. Ерзин И.В. Ландшафт как функциональная подсистема населенного места // Лесной вестник. – 2018. – Т.22, №3. – С. 85-89.

4. СП 59.13330.2020 «Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения» (актуализированная редакция СНиП 35-01-2001): утв. приказом Минстроя России от 30.12.2020 № 904/пр (в ред. Изменения № 4, утв. приказом Минстроя России от 27.12.2024 № 938/пр).

5. Kaplan R., Kaplan S. The Experience of Nature: A Psychological Perspective // Psychology, New York: Cambridge University Press, 2015. – Vol.6, No.10.

6. Линч К. Образ города. – М.: Стройиздат, 1982. – 328 с.

7. Ландшафтно-градостроительный анализ: методические указания к выполнению практических работ для студентов бакалавриата 2 курса направления 07.03.04 «Градостроительство» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университете»; сост.: Е.И. Гурьева. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. – 32 с.

8. Appleyard D. Livable Streets // Berkeley: University of California Press, 1981. – 364 p.

9. Carmona M., Heath T., Oc T., Tiesdell S. Public Places, Urban Spaces: The Dimensions of Urban Design. – 2nd ed. – Oxford: Architectural Press, 2010. – 416 p.

10. Ulrich R.S. View through a window may influence recovery from surgery // Science. – 1984. – Vol. 224, No. 4647 – P. 420–421. DOI: 10.1126/science.6143402 EDN: IDTECD

УДК 711.5:712.7

Кожевникова Ю. Б.
Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, Мытищи, Россия

ОСТАНОВКА НЕВОЗМОЖНА: СИСТЕМНАЯ НЕХВАТКА УЛИЧНОЙ МЕБЕЛИ КАК МАРКЕР НЕУВАЖЕНИЯ К ПЕШЕХОДУ

Аннотация: Статья посвящена проблеме системной нехватки уличной мебели в жилых зонах крупного города и её влиянию на восприятие пешеходом комфорта и безопасности городской среды. Актуальность исследования обусловлена тем, что современный город часто ориентирован на транзит, где приоритет отдается скорости перемещения, а не качеству пребывания человека в пространстве. Цель работы — выявление связи между дефицитом малых архитектурных форм и ощущением отчуждения горожанина от среды, а также разработка рекомендаций по гуманизации таких участков. Методика базируется на натурном маршрутно-визуальном анализе 15 кварталов на территории районов Дорогомилово и Филевский парк в Москве (общая площадь исследования 35,5 га) с составлением карты размещения уличной мебели относительно путей передвижения пешеходов. В результате исследования установлено, что на территориях между жилой застройкой и улицами города отсутствие уличной мебели наблюдается в 85% случаев, что превращает улицу в «стерильный коридор». В дворовых территориях нехватка мебели коррелирует с преобладанием парковочного пространства (16% случаев), а в зонах у образовательных учреждений отсутствие инфраструктуры для ожидания создаёт постоянное напряжение у жителей. Гипотеза подтвердилась: отсутствие возможности присесть служит визуальным маркером, указывающим на «второстепенность» пешехода в планировочной концепции города. Предложены две группы практических мер: внедрение стандарта обязательного присутствия малых архитектурных форм на каждые 100–150 метров линейного транзита и создание территорий тихого отдыха в зонах у образовательных учреждений.

Ключевые слова: уличная мебель, жилая зона, факторы дискомфорта, транзитные коридоры, инфраструктура ожидания, гуманизация городской среды, пешеходные траектории, городской транзит.

Введение

Современный город часто ориентирован на транзит, где приоритет отдается скорости перемещения, а не качеству пребывания в пространстве. В районах сложившейся застройки, таких как Дорогомилово или Филевский парк, пешеходная среда нередко превращается в чисто функциональный коридор. Отсутствие мест для отдыха становится индикатором того, что пространство спроектировано без учета психофизиологических потребностей человека. Целью данного исследования является выявление связи между дефицитом уличной мебели и ощущением отчуждения горожанина от среды, а также разработка рекомендаций по гуманизации таких участков.

В данном контексте особенно важным представляется рассмотрение повседневных сценариев использования городской среды: человек не только передвигается от точки А к точке Б, но и совершает промежуточные остановки, меняет темп движения, наблюдает за происходящим, общается, сопровождает детей или пожилых родственников. В тех частях города, где подобные сценарии не поддерживаются элементами благоустройства, формируется скрытое давление на пользователя пространства: он вынужден все время оставаться в движении, подстраиваясь под логику транспортной системы, а не под собственный физический и эмоциональный ритм. Для уязвимых групп населения – маломобильных граждан, людей старшего возраста, родителей с детьми, людей с хроническими заболеваниями – это давление проявляется особенно ярко и может становиться фактором отказа от прогулок или самостоятельных передвижений. В результате формируется замкнутый круг: чем менее дружелюбной оказывается среда для пеших практик, тем сильнее закрепляется зависимость от автомобиля и тем слабее становится мотивация выходить в городское пространство без транспортного средства.

Методика исследования

Необходимо проверить гипотезу о том, что системная нехватка уличной мебели и скамей является не просто техническим упущением, а маркером игнорирования интересов двух типов деятельности пешеходов, один из которых проходит территорию транзитом, а второй просто прогуливается. Необходимо понять, как отсутствие возможности для отдыха влияет на восприятие горожанином безопасности и комфорта. Исследования использования общественных пространств показывают, что наличие мест для сидения напрямую связано с переходом от сугубо транзитной активности к факультативной и социальной, повышающей качество городской жизни [2].

Важным аспектом сформулированной гипотезы является разделение функций уличного пространства на инструментальную (обеспечение перемещения) и экзистенциальную (создание условий для проживания и переживания города). Если первая относительно легко поддаётся количественным измерениям через показатели пропускной способности и скорости движения, то вторая фиксируется опосредованно – через наблюдение за поведением людей, длительность их пребывания на участке, количество спонтанных остановок, характер неформальных практик. Отсутствие уличной мебели выступает своеобразным ограничителем экзистенциальной функции: человеку негде задержаться без ощущения «нарушения» скрытых правил пространства. Это делает особенно актуальным натурный анализ, учитывающий реальные, а не декларируемые в проектах, модели использования территории.

Для проверки этой гипотезы было проведено натурное исследование, охватывающее территории жилых зон районов Дорогомилово и Филевский парк в Москве, общая площадь исследования составила 35,5 га. В ходе исследования

била составлена карта размещения МАФ относительно путей передвижения пешеходов.

Картографирование включало не только локализацию скамеек и иных элементов уличной мебели, но и фиксацию их ориентации, состояния, доступности в разные сезоны года и времена суток. Отмечалось, находятся ли элементы мебели на прямом пути движения или требуют отклонения от основной траектории, обращены ли они к зелёным зонам или к проезжей части, имеются ли визуальные и акустические барьеры, обеспечивающие относительную приватность. Дополнительно учитывалось, используются ли скамьи по прямому назначению или служат импровизированными местами складирования, курения, временного хранения инвентаря. Это позволило оценить не только формальное присутствие мебели, но и её реальную включённость в повседневную жизнь территории. Подобная фиксация связей между направлением пешеходных потоков и качеством среды опирается на представление о «пешеходном городе», где приоритет пешеходной инфраструктуры и наличие точек остановки является ключевым условием формирования комфортной городской ткани [6].

Анализу подлежат 4 типа территорий: территории между жилой застройкой и улицами города, территории между жилой застройкой и межквартальными дорогами, дворовые территории и дворовые территории с прилегающими образовательными учреждениями. Выбор именно этих четырёх типов обусловлен их различной функциональной нагрузкой и специфическим сочетанием транзитных и рекреационных сценариев. Территории между жилой застройкой и улицами города представляют собой, как правило, наиболее жёстко регламентированные транзитные коридоры, где приоритет отдаётся движению транспорта и обеспечению пропускной способности магистралей. Пространства между жилой застройкой и межквартальными дорогами часто выступают полуприватными зонами, формально относящимися к жилой среде, но фактически подчинёнными логике подъезда автотранспорта и организации парковок. Дворовые территории, особенно закрытого или полузакрытого характера, в большей степени ориентированы на повседневную рекреацию жителей, однако нередко перегружены утилитарными функциями. Дворы, соседствующие с образовательными учреждениями, представляют собой сложные узлы пересечения детских, родительских и «чисто жилых» маршрутов, где конфликты использования особенно заметны при дефиците мест для ожидания и кратковременного отдыха.

Эмпирическое обследование было проведено методом маршрутно-визуального анализа с фотофиксацией особенностей территории (на снимке с карты фиксируются местоположение в момент съемки, т.е. точка обзора, угол обзора для оценки территории и достаточная площадь застройки для понимания градостроительной обстановки) [3]. При обработке полученных данных были

выделены участки дорожно-тропиночной сети протяжённостью более 200 метров, на которых отсутствует уличная мебель.

Протяжённость в 200 метров была выбрана как пороговое значение, исходя из усреднённых показателей комфортной дистанции без остановки для человека со средней физической подготовкой. В реальных условиях, с учётом неровности покрытия, сезонных факторов (гололёд, жара), наличия перепадов высот и необходимости переносить тяжёлые сумки или детские принадлежности, фактическая комфортная дистанция может быть ещё меньше. Тем не менее даже при условно «щадящей» оценке были выявлены значительные по протяжённости отрезки, на которых человек лишён возможности сделать паузу. Маршрутно-визуальный анализ позволил дополнить количественные данные качественными наблюдениями: фиксировались места вынужденных остановок без опоры (на обочине, у стены здания, на бордюре), эпизоды прислонения к опорам или временным конструкциям, а также случаи, когда люди садились на не предназначенные для этого элементы (ограждения, парапеты, лестничные марши).

Логическая классификация точек дискомфорта, т.е. где человек вынужден идти без остановки более 15 минут и сопоставление их с показателями интенсивности потока. Продолжительная ходьба без возможности присесть и сделать паузу, особенно для пожилых и маломобильных групп, связана с ростом утомляемости, напряжения и ухудшением субъективного самочувствия, что подчёркивается в исследованиях взаимосвязи городской среды и здоровья населения [4].

Классификация точек дискомфорта проводилась с учётом не только временного и пространственного параметров, но и характеристик окружения: уровня шума, визуальной перегруженности, наличия или отсутствия тени, степени «просматриваемости» участка, близости интенсивного транспортного потока. Для каждой точки фиксировалось, воспринимается ли она как потенциальное место остановки (например, визуально укромный уголок, ниша во дворе, участок вдоль зелёных насаждений), или же среда прямо «отталкивает» от попытки задержаться. Сопоставление этих точек с интенсивностью пешеходного потока позволило выявить парадоксальные ситуации, когда наиболее нагруженные участки вовсе не обеспечены элементами поддержки, тогда как в менее востребованных местах отдельные скамьи используются эпизодически. Это подчёркивает, что существующее размещение мебели зачастую отражает не реальную структуру движения людей, а формальные решения или остаточные принципы благоустройства.

Результаты исследования

В результате натурного обследования 15 кварталов было выявлено следующее:

1. На територии между жилой застройкой и улицами города и територии между жилой застройкой и межквартальными проездами отсутствие уличной мебели наблюдается в 85% случаев, что заставляет жителей воспринимать улицу как «стерильный коридор», не предназначенный для жизни. Данный показатель можно считать критическим, так как он свидетельствует о практически полном отсутствии условий для кратковременного отдыха на наиболее значимых с точки зрения повседневной мобильности участках. Визуальные наблюдения показали, что на подобных отрезках улиц люди, испытывающие усталость или дискомфорт, вынуждены либо продолжать движение, игнорируя собственные физические потребности, либо искать импровизированные места для остановки: опираться на стены зданий, прислоняться к опорам освещения, садиться на бордюры и лестничные марши. Подобные практики не только свидетельствуют о несоответствии пространства базовым эргономическим требованиям, но и формируют у пользователей устойчивое ощущение временности и неуместности пребывания. Улица перестаёт восприниматься как часть «дома вне дома» и превращается в транзитный шлюз между более значимыми точками маршрута. Особенно выражено это на участках, прилегающих к остановкам общественного транспорта, где ожидающие вынуждены стоять в плотных группах без возможности сесть, что усиливает утомляемость и раздражение, особенно в часы пик и в неблагоприятных погодных условиях.

2. В дворовых территориях нехватка уличной мебели коррелирует с преобладанием парковочного пространства. Там, где могли бы быть места отдыха, сконцентрированы автомобили, что вытесняет пешехода. Отсутствие МАФ на данной территории наблюдается в 16% случаев.

Корреляция между дефицитом уличной мебели и доминированием парковочных мест свидетельствует о приоритетном внимании к интересам автовладельцев по сравнению с интересами пешеходов и жителей без личного транспорта. В реальной пространственной конфигурации это выражается в том, что наиболее удобные по инсоляции, видовым характеристикам и близости к подъездам участки занимают ряды машин, тогда как потенциальные зоны отдыха оказываются вытесненными на периферию двора или вовсе отсутствуют. В таких дворах фиксировались ситуации, когда родители с детьми или пожилые жители вынуждены были располагаться на краю проезжей части, на технических полосах или у контейнерных площадок, что ухудшает не только субъективное восприятие комфорта, но и реальную безопасность. Нехватка скамеек порождает конкуренцию за немногие доступные элементы среды – лестницы, парапеты, низкие ограждения. В результате двор утрачивает функцию места повседневного общения и созерцательного отдыха, превращаясь в склад автомобилей с минимальными возможностями для человеческого присутствия вне транспортного сценария.

3. В дворовых территориях, где есть соседство с территориями образовательных учреждений выявлена высокая частота посещения людей при отсутствии инфраструктуры для ожидания вблизи самих учреждений, что создает постоянное напряжение у жителей. Людям от безвыходности приходится искать зоны рекреации во дворе жилого дома, увеличивая рекреационную нагрузку. Отсутствие уличной мебели и скамей на данной территории наблюдается также в 16% случаев.

В подобных дворах наблюдается характерный конфликт между регулярными пиковыми потоками родителей и детей, прибывающих к образовательным учреждениям утром и вечером, и потребностью постоянных жителей в спокойной, предсказуемой среде. Отсутствие специализированных зон ожидания у входов в школы и детские сады вынуждает сопровождающих занимать любое доступное пространство: вдоль фасадов жилых домов, на детских площадках, на транзитных дорожках. Это увеличивает плотность присутствия людей в ограниченных зонах, создаёт ощущение «перенаселённости» двора и усиливает акустическую нагрузку. При этом даже в условиях высокой посещаемости нередко отсутствуют скамьи, навесы или хотя бы горизонтальные поверхности, позволяющие удобно расположиться. В результате для жителей домов это становится источником чувства потери контроля над пространством своего двора. Повышенная рекреационная нагрузка на ограниченное число доступных мест отдыха приводит к их быстрому износу, замусориванию и, как следствие, дополнительному ухудшению визуального облика территории.

В совокупности три выделенные выше типа ситуаций демонстрируют, что проблема нехватки уличной мебели не является локальным дефектом отдельных участков, а носит системный характер и проявляется во всех исследованных типах территорий. При этом в каждом случае дефицит МАФ накладывается на специфическую функциональную конфигурацию пространства: транзитные коридоры между домами и улицами, парковочно-транзитные дворы, дворы с повышенной динамикой, связанной с образовательными учреждениями. Это позволяет говорить о том, что отсутствие скамеек и мест для отдыха неслучайно, а встроено в преобладающую модель принятия проектных и управленческих решений, в которой человек преимущественно мыслится как движущийся объект, а не как субъект, обладающий правом на остановку, наблюдение и созерцание.

Анализ показывает, что нехватка уличной мебели - это отражение планировочной концепции, где человек рассматривается как «единица потока», а не как пользователь пространства [7]. В современных подходах к формированию общественных пространств акцент делается на многофункциональность, разнообразие сценариев пребывания и наличие

елементов, поддерживающих длительное нахождение человека в среде, включая уличную мебель и места для тихого отдыха [5].

Сопоставление выявленных натурных данных с указанными подходами демонстрирует существенный разрыв между теоретическим дискурсом о человеко-ориентированном городе и фактической планировочной практикой в жилых районах. Если в профессиональной литературе и стратегических документах подчёркивается значимость «города коротких дистанций», развития локальных общественных пространств и поддержания повседневных пешеходных маршрутов, то реальная структура дворов и прилегающих к ним уличных пространств часто продолжает воспроизводить модель, характерную для периода доминирования микрорайонного строительства и приоритета автомобильного транспорта. Характерно, что даже там, где скамьи формально присутствуют, они нередко располагаются без учёта инсоляции, визуальных связей и сценариев использования: например, ориентированы на парковку или проезжую часть, установлены на сквозном ветру или в плотной тени, не имеют визуальной защиты от интенсивных потоков, что снижает мотивацию к их использованию. Это показывает, что само по себе количественное наличие уличной мебели ещё не гарантирует качества среды, если не учитываются контекст и реальные потребности пользователей.

Выводы и обсуждение

Гипотеза подтвердилась: отсутствие возможности присесть служит визуальным маркером, указывающим на «второстепенность» пешехода, так как не учтены потребности в отдыхе на часто используемых территориях, желания присесть в месте ожидания, вытеснение пешехода предпочтением размещения парковочных зон. Город, требующий от человека постоянного движения, транслирует агрессию и игнорирует базовые потребности в остановке для ориентирования или отдыха. Чрезмерный акцент на эффективности транзита зачастую лишает городскую среду гуманистического измерения, превращая ее в безликую «машину для перемещения» [1]. Между тем улица в ряде отечественных исследований рассматривается как ключевое общественное пространство города, где возможность задержаться, присесть, понаблюдать и вступить в спонтанные контакты является неотъемлемой частью её социокультурной функции [10].

Но если присмотреться к российским городам и многим постсоветским планировкам, то обнаруживается определенная закономерность: пешехода словно оставляют без выбора и различного вида помощи. Ему негде присесть, негде укрыться от дождя, негде поставить тяжёлую сумку, чтобы перевести дух или сделать паузу, если стало плохо. Системная нехватка уличной мебели - это маркер неуважения к человеку вне автомобиля. Можно трактовать как сообщение: «Обязательно идти куда-то, останавливаться времени нет, иди быстрее».

Связанность путей для пешеходных перемещений способствует их интенсификации и, как следствие, формированию условий для развития общественно-деловой и рекреационной инфраструктуры на территориях жилой застройки. [8]

Подтверждение гипотезы на основе натурных данных позволяет говорить о дефиците уличной мебели как о критически важном индикаторе качества городской среды. Визуальный образ улицы или двора без скамеек и иных мест для остановки

Практические рекомендации:

1. Внедрение стандарта обязательного присутствия малых архитектурных форм (МАФ) на каждые 100-150 метров линейного транзита. Соблюдение норм СП 59.13330.2020 (пункт 5.3.1) [9].

2. Создание территорий тихого отдыха в зонах у образовательных учреждений.

Развитие указанных направлений позволит развить более точное и обоснованное планирование. Также позволит опираться на четкие правила и стандарты, учитывать особенности каждого региона или города.

Список литературы:

1. Вукан Р. Транспорт в городах, удобных для жизни // Альпина PRO, 2023. – 676 с.
2. Гейл Я. Жизнь между зданиями: использование общественных пространств // Концерн «Крост», 2012. – 199 с.
3. Kaplan R., Kaplan S. The Experience of Nature: A Psychological Perspective // Cambridge University Press. – 1989. – 352 p.
4. Ревич Б.А. Планирование городских территорий и здоровье населения: аналитический обзор // Анализ риска здоровью. – 2022. – № 1. – С. 157-169.
5. Вотинов М.А. Особенности формирования общественных пространств в городской среде // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2014. – № 4. – С. 36-40.
6. Лежава И.Г. Проблемы формирования и пространственной организации центров досуга в современном городе: диссертация ... кандидата архитектуры: 18.00.00 / И. Г. Лежава. – Москва, 1970. – 154 с.
7. Линч К. Образ города / К. Линч; пер. с англ. В. Л. Глазычева. – Москва: Стройиздат, 1982г. – 328 с.
8. Каталог 2. Принципиальные архитектурно-планировочные решения // Минстрой России. – 2020.
9. СП 59.13330.2020. Свод правил. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения с изм. и допол. в ред. от 01.07.2021 // Минстрой России. – 2021.
10. Гаврилина Т.О. Социокультурное пространство города: структура, функции // Вестник Сургутского государственного педагогического университета. – 2019. – № 2 (59). – 26 с.

УДК 692.44:72.03

Рузманов Е. А.
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва, Саранск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ КРУЖАЛЬНЫХ КУПОЛОВ В СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ

Аннотация. В статье рассматривается развитие купольных конструкций в мировой архитектуре. Возникнув как способ завершения культовых зданий, в современной практике они используются для перекрытия общественных сооружений. На примерах выдающихся архитектурных памятников показаны эволюция конструктивных решений и приобретение куполами новых функциональных значений.

Ключевые слова: кружальные купола, сложные перекрытия, инженерные решения, проекты, технологии, архитектурно-строительные решения.

Кружальные купола представляют собой конструкции арочной формы, возводимые из множества коротких деталей (так называемых косяков), соединяемых в единую устойчивую систему [3, 10]. В современной архитектуре они применяются для перекрытия значительных пространств – круглых, многоугольных и эллиптических в плане зданий.

Такие конструкции состоят из нескольких ярусов, при этом в каждом ярусе изменяются длина или угол наклона косяков. Это усложняет заводское изготовление элементов и монтаж купола. Для упрощения сборки иногда предлагается заменять кружально-сетчатые купола сомкнутыми сводами, имеющими в плане вид правильных многоугольников [4].

Сверху на сетку из косяков обычно укладывается сплошной настил, который соединяется гвоздями с косяками и рёбрами и участвует в работе купола, воспринимая распор и повышая общую жёсткость покрытия.

Кружальные купола и родственные им конструкции используются в различных типах сооружений:

- **Спортивные объекты.** Павильоны для теннисных кортов, аквапарки, торговые залы, выставочные павильоны, многофункциональные складские помещения.
- **Храмы.** В современных культовых сооружениях могут применяться пространственные кружальные фермы из алюминия.
- **Промышленные и сельскохозяйственные сооружения.** Для перекрытия больших пролётов.

Технология особенно актуальна в условиях ограниченного пространства, при сложном рельефе или слабых грунтах, когда требуется

монтаж без использования тяжёлой техники. Среди преимуществ кружальных куполов в современном строительстве можно выделить:

- **Прочность и устойчивость.** Сферическая форма и система соединений элементов обеспечивают высокую несущую способность.
- **Равномерное распределение нагрузок,** что повышает общую устойчивость сооружения.
- **Технологичность.** Возможность заводского изготовления элементов и их транспортабельность.
- **Возможность реализации сложных архитектурных форм.**

Однако проектирование и возведение таких конструкций требуют высокой точности и частого использования компьютерных программ для расчётов.

В истории известно множество решений в архитектурно-строительной технике, основанных на принципе кружальных куполов, начиная с эпохи Античности. Купол не был известен египтянам и редко использовался греками, но стал важным элементом римской архитектуры. Попытки создания криволинейных крыш, в том числе куполов, предпринимались ещё в Древнем Риме. До V века купола сооружались только над круглыми в плане зданиями. Таковым является самый древний из сохранившихся куполов – в римском Пантеоне, возведённом примерно в 128 году н. э. [1, 2]. Первыми материалами были камень и дерево, но из-за сложности обработки и эксплуатации камень впоследствии перестали использовать.

Купол Пантеона был впервые построен с применением более совершенного материала – бетона, внутри которого скрыт скелет из кирпичных арок. Распор купола и его тяжесть воспринимаются массивными стенами толщиной 6 метров. Для облегчения стен и придания им зрительной лёгкости в них устроено 8 внутренних больших ниш и столько же наружных пустот. Это сооружение представляет собой крупное инженерное достижение античности; вплоть до XIX века оно оставалось обладателем купола самого большого диаметра.

Несколько столетий спустя, в 537 году, был построен ещё один огромный купол, возведённый уже над квадратным в плане сооружением – Собор Святой Софии в Константинополе [5]. Поддерживаемые столбами арки, своды, полукупола и купола стали ведущими конструктивными элементами. Дальнейшее развитие структур и форм купола сдерживалось «кирпичной» технологией строительства.

В последующие эпохи купола продолжали использоваться в строительстве памятников архитектуры, но их возведение основывалось на принципах, заложенных в Пантеоне, а конструкция тщательно изучалась. Новую жизнь купольным конструкциям подарили мастера эпохи Возрождения. Примером служит Филиппо Брунеллески, спроектировавший и

построивший купол Санта-Марии-дель-Фьоре во Флоренции [2]. Ему принадлежит новаторское инженерное решение по расчленению несущих и ограждающих конструкций – идея двухслойного каркаса, укреплённого рёбрами. Это был один из первых шагов перехода от архитектуры Средневековья к архитектуре Ренессанса.

Одним из выдающихся творений архитектора конца XVII – начала XVIII века Кристофера Рена является Собор Святого Павла в Лондоне, который причудливо сочетает элементы готики, классицизма и барокко, служа примером совершенствования купольных систем. В процессе проектирования собора Рен разработал уникальный тройной купол. Он состоит из внутреннего купола-потолка, внешнего деревянного каркаса, покрытого свинцовыми листами, и скрытого между ними промежуточного кирпичного конуса. Именно этот конус воспринимает основную нагрузку и служит опорой для 800-тонного каменного фонаря. Геометрия купола К. Рена близка к форме перевернутой цепной линии (кривой, работающей исключительно на сжатие), к идее использования которой архитектора подтолкнул его коллега, физик Роберт Гук.

Будучи гениальным ученым и конструктором, К. Рен часто сталкивался с недоверием современников к его расчетам. Ярким примером его инженерного остроумия стала перестройка городской ратуши (Гилдхолла) в Виндзоре в 1689 году [1, 5]. Городской совет, опасаясь обрушения перекрытий большой бесстолпной залы, потребовал от архитектора установить дополнительные промежуточные опоры. Рен подчинился, однако выполнил требование лишь декоративно: возведенные им колонны не доходили до потолка, оставляя свободный зазор. Увидеть этот обман снизу было практически невозможно, и колонны годами не несли никакой нагрузки, доказав точность первоначального безмоментного расчета мастера. В самом же Соборе Святого Павла для маскировки массивных контрфорсов, воспринимающих распор от центрального купола, архитектор применил другую строительную хитрость — возвел фальшивые вторые ярусы стен (стены-ширмы) вдоль боковых нефов.

На этом купольные решения не остановились. На протяжении веков они совершенствовались в зависимости от применяемого строительного материала. Конец XVIII века открыл новую эпоху в строительстве куполов – существенно выросли пролёты, уменьшилась толщина оболочки. Всё это в сочетании с прочным материалом позволило создавать проекты сооружений с куполами диаметром до 100 метров. Появившаяся в начале XIX века сетчатая конструктивная схема укрепила позиции металла [7, 9]. Конструкция купола стала прочнее, легче при монтаже, экономичнее и изящнее по сравнению с деревянными и железобетонными аналогами, а главное – она позволила возводить сооружения диаметром до 250 метров, что, естественно, не является

пределом. Постепенно, от своей первостепенной задачи – перекрытия больших пространственных частей здания – купола перешли к выполнению и других функций, например, эстетического украшения городской застройки и создания яркого, запоминающегося образа здания.

И если раньше купольные конструкции применялись в архитектуре общественных зданий, преимущественно храмовых, то позднее они стали использоваться в сооружениях иного функционального назначения. Ещё в XIX веке купола редко встречались в жилищном строительстве, но постепенно вошли в практику возведения больших оранжерей, планетариев, аудиторий, складов, ангаров. С развитием строительных технологий и появлением новых материалов, в том числе полимерных, архитекторы стали проектировать ещё более разнообразные формы купольных перекрытий.

В 1896 году российский инженер и архитектор В. Г. Шухов запатентовал конструкцию перекрытий, получившую название «перекрытие-оболочка», которая включает выпуклые, висячие, сетчатые и мембранные оболочки [6]. Примером дальнейшего совершенствования архитектурной формы и несущей сетчатой оболочки является геодезический купол. Такие купола обладают большой несущей способностью; их возводят достаточно быстро из лёгких элементов силами небольшой строительной бригады. Кроме того, они имеют идеальную аэродинамическую форму, что позволяет строить их в ветреных и ураганоопасных районах.

Патент на конструирование геодезических куполов получил Ричард Фуллер, которого считают родоначальником строительства купольных домов [7]. Это ещё одна революционная идея в области купольных конструкций. Купольный дом обладает рядом колоссальных преимуществ: необычным внешним видом, свободной планировкой внутренних помещений благодаря отсутствию внутренних опорных стен и колонн, возможностью возведения в сейсмически неблагополучных районах, минимальными требованиями к фундаменту. Его отличает относительная дешевизна постройки и эзотерическая составляющая. Однако массового распространения такой дом не получил.

Ещё два выдающихся примера сооружений с купольными конструкциями – стадион «Астродром», построенный в 1965 году в Хьюстоне (США) и ставший родоначальником крытых стадионов с куполообразной крышей, а также крупнейшее сферическое сооружение в мире – «Глобен-Арена», возведённая в 1989 году в Стокгольме (Швеция) [8].

Благодаря огромному мировому опыту в строительстве и архитектуре новаторские идеи сегодня сменяют друг друга с большой скоростью. Купольные решения применяются даже в индивидуальных домах. Ознакомившись с историей купольных конструкций, в качестве одного из вариантов реконструкции Пензенского планетария (г. Пенза, Россия) можно

предложить купольное решение, которое либо возродит идеи прошлого – напоминая купол реновского собора, либо будет отвечать современным требованиям – с использованием элементов оболочки-перекрытия.

Список литературы:

1. Алексеев Ю. В. История архитектуры градостроительства и дизайна : курс лекций для студетов, обучающихся по направлению 653500 «Строительство» / Ю. В. Алексеев, В. П. Казачинский, В. В. Бондарь // Москва: Ассоциация строительных вузов, 2004. – 447 с. EDN: QNKLEF
2. Шуази О. Всеобщая история архитектуры / О. Шуази // Москва: Эксмо, 2008. – 703 с. EDN: QNNQVF
3. Пятикрестовский К. П. Нелинейные методы механики в проектировании современных деревянных конструкций: монография / К. П. Пятикрестовский // Москва: МГСУ, 2014. – 214 с. EDN: WINGFP
4. Садэтов Т. С. Эллиптические деревянные кружально-сетчатые своды / Т. С. Садэтов, А. Д. Миронова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2012. – № 6(129). – С. 72–76. EDN: PJCQED
5. Филиппов В. А. Основы геометрии поверхностей оболочек пространственных конструкций. Учебное пособие / В. А. Филиппов // Москва: Физматлит, 2009. – 192 с.
6. Петропавловская И. А. Владимир Григорьевич Шухов (очерк жизни и деятельности) / И. А. Петропавловская // Великий русский инженер В.Г. Шухов и его научное наследие: Материалы международной конференции, Москва, 25–27 ноября 2013 года. – Москва: МАКС Пресс, 2013. – С. 65-78. EDN: YPSAGB
7. Ибрагимов А. М. Складной сетчатый купол: постановка задачи и построение поверхности / А. М. Ибрагимов, Н. В. Попова // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 5. – С. 18-21. EDN: USDAJW
8. Казакова И. С. Пространственные металлические конструкции покрытий зданий: учебное пособие / И. С. Казакова // Вологда: Вологодский государственный университет, 2017. – 127 с. EDN: YPHFEF
9. Кузяева Н. А. Купольные конструкции как способ реализации новых архитектурных идей / Н. А. Кузяева, В. С. Горбунова // Перспективы науки и образования. – 2014. – № 1 (7). – С. 269–272. EDN: RVOKKR
10. Кривошапко С. Н. Из истории строительства деревянных оболочек и их возможности в настоящем и будущем / С. Н. Кривошапко, К. П. Пятикрестовский // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2014. – № 1. – С. 3–18. EDN: PZGHSY

УДК 72.01:72.038

Пушкарева С. А.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

BAUHAUS И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ АРХИТЕКТУРА: ПРОДОЛЖАЕТСЯ ЛИ МОДЕРНИЗМ В ЦИФРОВУЮ ЭПОХУ?

Аннотация. Статья посвящена вопросу преемственности модернистской традиции в современной параметрической архитектуре. На основе анализа теоретических концепций Bauhaus и трудов Патрика Шумахера, а также изучения практических объектов (Захи Хадид, Норман Фостер) показано, что переход от индустриального проектирования к цифровому не отменяет, а трансформирует ключевые принципы модернизма: функциональность, технологичность и системный подход. Параметрическая архитектура трактуется как эволюционное развитие идей Баухауса в условиях постфордистской экономики и вычислительных технологий.

Ключевые слова: Bauhaus, параметрическая архитектура, цифровое проектирование, модернизм, алгоритмическое формообразование, функционализм, системный подход.

Введение

Bauhaus открылся в 1919 году в Веймаре, его основал Вальтер Гропиус. Школа и спустя столетие остаётся точкой отсчёта для архитектурной мысли. И это неудивительно: Bauhaus возник в момент, когда бурная индустриализация буквально заставляла заново определить отношения искусства, ремесла и машинного производства. Главные ориентиры? Функциональность, честное отношение к материалам, выпуск качественных вещей для широкого потребителя. Гропиус верил: архитектура способна менять к лучшему социальную жизнь, а новые технологии обязаны служить человеку. В программной работе он писал: «Конечная цель всякого художественного творчества – строительство! … Архитекторы, скульпторы, живописцы, мы все должны вернуться к ремеслу» [1].

Спор о том, жив ли дух модернизма в цифровую эпоху, идёт уже больше двадцати лет. Патрик Шумахер, партнёр Zaha Hadid Architects, без колебаний называет параметризм «новым глобальным стилем после модернизма». В манифесте он пишет: «Параметризм – это великий новый стиль после модернизма … Он обладает собственной внутренней логикой, которая в конечном счёте преобразит все сферы проектирования» [6]. Брендан Коларевич показывает, как параметрическое проектирование подхватывает системное мышление модернистов, переводя его на язык алгоритмов и вариативных моделей [3]. Грег Линн исследует переход от статичных форм к

«оживлённым» системам – где поведение материалов и среды сразу закладывается в проект [4].

Но согласны с этим не все. Иная позиция – у критически настроенных авторов. Шах с соавторами разбирают разрывы и параллели между модернизмом и параметризмом – особенно в организации пространства и зрительном восприятии [5]. Ал-Аззави прямо называет параметрическую архитектуру «вторым международным стилем», подчёркивая её глобальный размах [7]. Ривка Оксман детально изучает модели параметрического дизайн-мышления и то, чем они отличаются от традиционной модернистской логики [8].

Обзор литературы

Проблематика соотношения модернизма и параметризма получила разностороннее освещение. Работы П. Шумахера [6; 7] и Б. Коларевича [3] рассматривают параметризм как новую стилистическую парадигму, выросшую из системного подхода модернизма. Критический взгляд представлен в статьях М. Шаха [5] и А. Самалавичюса [21], анализирующих разрывы и риски формализации. Историко-теоретическое обоснование связи между картезианской геометрией модернизма и топологическими поверхностями параметризма дано в работах Й. Заволеаса [13] и М. Миндиашвили [14]. Особое место занимают исследования педагогической преемственности (С. Октан [18]) и изменения роли архитектора (Р. Оксман [8], К. Бойченко [12]).

Методы исследования

Методология работы базируется на сравнительно-историческом и проектно-аналитическом подходах. Изучены первоисточники Bauhaus (манифесты, учебные программы), теоретические труды по параметризму, а также реальные архитектурные объекты 2010–2024 годов. Сравнение проводилось по критериям: функциональность, технологичность, системность и роль автора. Визуальный и морфологический анализ выполнялся с использованием данных из открытых архитектурных источников и проектной документации.

1. Основные принципы Bauhaus: связь искусства и технологий, функционализм и стандартизация

В 1919 году Вальтер Гропиус открыл в Веймаре школу Bauhaus. Философия школы держалась на трёх идеях. Искусство и технология неразрывны. Форма следует функции. А стандартизация призвана работать на качество, а не против него. Эти установки не оставались лозунгами, а пронизывали устройство мастерских. По сути, из них вырос весь модернизм [1; 2].

Идея слияния искусства и техники возникла как реакция на разрыв между творчеством и машинным производством, который обострился в XIX

веке [1; 5]. Гропиус утверждал, что «нет принципиальной разницы между художником и ремесленником» [1], и считал машину современным инструментом дизайна, а не угрозой эстетике. Движение «Искусства и ремёсла» романтизировало ручной труд и критиковало индустрию, а Баухаус, наоборот, не звал обратно к ремеслу. Он стремился художественно освоить машинную логику. На практике это вылилось в систему мастерских (Werkstätten). Фактически это были экспериментальные лаборатории: в них изучали материалы, осваивали технологии, решали композиционные задачи. Иоганнес Иттен, Йозеф Альберс, Ласло Мохой-Надь и другие преподаватели выстраивали обучение так, что технический эксперимент и эстетический поиск шли рука об руку [3; 4].

Функционализм Баухауса к плоской полезности не сводился. Это была честность. Форма должна была прямо выражать конструкцию, материал, способ изготовления и назначение, нести социальный смысл. Качественный, рациональный дизайн предназначался массовому потребителю, а не избранным. Именно так виделся путь демократизации быта. Архитектура и вещная среда понимались как инструменты общественного прогресса. Гропиус часто подчёркивал: «дом и его обстановка должны иметь осмысленную связь с жизнью людей» [1].

Стандартизация для школы не была самоцелью. Скорее – инструментом. Через неё рассчитывали обеспечить высокое качество в индустриальных условиях. В программных текстах Гропиус много внимания уделял типизации строительных элементов. Он доказывал, что стандарт не уничтожает творческую свободу, а переводит её в иную плоскость: архитектор начинает мыслить не отдельными объектами, а системами совместимых компонентов. Типизировали не только готовые вещи, но и процессы: от знаменитого вводного курса (Vorkurs) до методик структурного проектирования. Позже именно такой системный подход позволил разглядеть в Баухаусе предтечу методологии цифрового дизайна [2; 5].

Так эта концептуальная четвёрка (искусство, технология, функция, стандарт) показала себя на удивление устойчивой. Переход от механики к цифре не сделал принципы устаревшими. Их пришлось переосмыслять в новом технологическом контексте, что стало одной из главных линий архитектурной теории в начале XXI века.

2. Особенности параметрической архитектуры и алгоритмического моделирования

Параметрическую архитектуру правильнее понимать не как способ создавать форму, а как процесс. Геометрия здесь вырастает из системы параметров и алгоритмических правил. Изменили один параметр – и вся модель перестраивается. Ручными методами такого не добиться. Десятки вариантов генерируются и сравниваются в реальном времени. Чем не

цифровая революция? [8; 11]. Такая техника появилась с распространением компьютеров и специального софта, но корни её мышления уходят в системные идеи модернизма [6; 7].

Обычно выделяют три подхода: параметрический, алгоритмический и генеративный. Но границы между ними удивительно размыты. Параметрический дизайн работает через зависимости и ограничения. Алгоритмический – через последовательность процедур. Генеративный – через автоматическое получение вариантов [8]. На практике эти три линии часто смешиваются. Параметрическая модель может содержать и алгоритмические куски, и генеративные процедуры, так что границы между ними условны. Споры об этом идут до сих пор.

Сегодня архитекторы всё чаще работают через Rhino + Grasshopper, Dynamo и похожие платформы. На первый взгляд – просто новый софт. На деле – изменение самой логики проектирования. Благодаря им параметрические методы стали доступны архитекторам без глубокой подготовки в программировании. Визуальное программирование, при котором алгоритм собирают из графических блоков и соединяют их, позволило работать со сплайнами, алгебраическими кривыми, аппроксимациями и комбинаторикой так же наглядно, как с традиционным эскизом [9].

Главный теоретик параметризма – Патрик Шумахер. В 2008 году он объявил параметризм «новым глобальным стилем после модернизма». Его тезис: «Фундаментальный композиционный принцип параметризма – артикуляция внутренних и внешних различий через непрерывную дифференциацию и корреляцию» [7]. Эту эстетическую программу поддерживают технологии цифрового производства: CAD/CAM, 3D-печать, роботизированная сборка. Они делают экономически реальной массовую кастомизацию: каждый элемент здания может быть уникальным, а стоимость почти не растёт [10].

Визуально параметрическая архитектура совсем не похожа на ортогональный модернизм. Но методологически они связаны глубоко. Обе линии хотят выстроить цельную, непротиворечивую проектную систему, которая держится на объективных закономерностях. Модернизм для этого применял статичную модульную сетку, параметризм – динамическую систему из связанных элементов, способную подстраиваться под меняющиеся условия. И там, и там в основе лежит систематический, рациональный метод [11].

Параметрические инструменты сейчас всё плотнее интегрируются с BIM-технологиями. Это позволяет не только выдавать сложную геометрию, но и следить за поведением здания на всех этапах: от стройки до эксплуатации и возможной смены функции. Такая линия продолжает модернистскую идею

полного контроля над проектом, только переводит её на иной технологический уровень [12].

3. Сравнение подходов модернистской архитектуры и параметрического метода формообразования

Сравнение методов формообразования у Баухауса и в параметрической архитектуре показывает и глубинное родство, и серьёзные различия: сказалась смена технологического уклада. Модернисты работали в рамках картезианской геометрии: прямые линии, плоские поверхности, жёсткая ортогональность. Это был не только эстетический выбор. За ним стояла фордистская индустриальная логика с её тягой к стандартизации, префабрикации, повторяемости [13].

Параметрическая архитектура, наоборот, имеет дело с топологическими поверхностями: непрерывными, эластичными оболочками, форма которых диктуется потоками данных. Внешне выглядит как полный разрыв с эстетикой модернизма. Но корни таких поверхностей уходят в эксперименты позднего модернизма с его интересом к адаптивности, неравновесности, плавным переходам. Исследования, восстанавливающие линию от картезианской геометрии к топологической, показывают: параметрическая архитектура не отвергает модернизм, а реализует те его возможности, которые индустриальная эпоха ещё не могла технически воплотить [13].

Шумахер фактически меняет философию порядка: от одинаковости – к непрерывному разнообразию [6]. Модернистская стандартизация предполагала массовый выпуск одинаковых элементов. Параметрическая архитектура выстроена на массовой кастомизации: уникальным может стать каждый элемент, и без экономических потерь. Но если копнуть глубже, оба подхода объединяет системное мышление. Модульная сетка модернистов и ассоциативная параметрическая модель – это два способа упорядочить сложность. Исследователи «нового модернизма» отмечают, что плоскостная сетка Баухауса перерастает в трёхмерную сетку параметрической архитектуры, порождая новые конструктивные единицы: оболочки, блобы и другие формы, которые вне логики цифровой сетчатой структуры просто невообразимы [14].

Понятие функциональности (центральное для доктрины Баухауса) тоже сильно изменилось. Модернистский функционализм сводил функцию главным образом к утилитарному назначению помещения или здания. Именно здесь различие становится особенно заметным. Параметрическая архитектура расширяет это поле, втягивая в него экологические характеристики (инсоляцию, акустику), конструктивные требования и экономические ограничения. Алгоритмические методы способны оптимизировать форму сразу по десяткам критериев. Архитектор-модернист делал похожую работу интуитивно, опираясь на опыт и простейшие расчёты. Яркий пример – башня

Мэри-Экс Нормана Фостера. Внешне она продолжает эстетику модернистского хай-тека, но её форма получена вычислительной оптимизацией аэродинамики и энергопотребления. Так параметрические инструменты поднимают модернистскую программу рационального обоснования формы на принципиально иной уровень [15].

Само понимание пространства тоже изменилось. Классический модернизм мыслил изолированными объёмами и чётко артикулированными функциональными зонами. Параметризм видит пространство как непрерывное поле, где границы размыты, а форма является итогом сложного взаимодействия массы факторов. Такая концепция сближает параметрическую архитектуру не столько с ортодоксальным модернизмом 1920-х, сколько с органической линией (Аалто, Утцон) и опытами позднего модернизма. Это лишний раз подтверждает: переход был скорее эволюционным, чем революционным [7; 13].

4. Анализ современных архитектурных объектов: черты модернистской проектной логики

Современная архитектурная практика полна зданий, внешне совсем не похожих на ортогональную строгость Баухауса. Но когда начинаешь разбираться, почти всегда обнаруживаешь связь с модернистской проектной культурой. Возьмём Кунстхаус в Граце (2003, Питер Кук и Колин Фурнье). Прямых линий там нет, биоморфная оболочка выглядит как полный антипод модернистского рационализма. Однако за внешней неправильностью скрыт точный математический расчёт: параметрическая модель просчитала геометрию каждой гнутой панели так, чтобы уникальная форма сочеталась с индустриальной технологичностью [16; 18]. Именно такого союза (художественной выразительности и производственной дисциплины) и добивался Баухаус. Просто в 1920-е годы это упиралось в технологические пределы механического производства.

MAXXI Захи Хадид (2009) превращает пространство в непрерывное поле. Текучие линии. Плавные переходы этажей стирают границы между стеной, полом, потолком. Среда сложна, нерегулярна, многозначна. Это прямая противоположность ясности, которую отстаивал ортодоксальный модернизм. Тот требовал порядка. Здесь порядок другой – алгоритмический [17]. Но за внешней спонтанностью работает системный расчёт. Каждый элемент композиции связан с соседними параметрическими зависимостями: сдвинул локальный параметр, и перестроилось всё целое. Методологическая системность, идущая от Баухауса, никуда не делась. Она просто поднялась на более высокий уровень абстракции и освободилась от обязательной геометрической простоты.

На градостроительном уровне похожий случай – генплан района Картал-Пендик в Стамбуле (2006, Zaha Hadid Architects). Его задумывали как

«гипермодернистский» параметрический урбанизм. Привычные требования, такие как функциональное зонирование, инсоляция, транспортные потоки, здесь не отброшены, а заложены прямо в алгоритмические модели [6]. Каждый квартал здесь выглядит иначе. Но хаоса не возникает. Всё удерживает единая система правил, общая для всего генплана. Модернистская идея тотального контроля над проектом, которую Гропиус связывал с типизацией, воплощается здесь через внешне противоположный ход: программируемое разнообразие. Но установка на рациональное обоснование каждого решения остаётся той же.

На уровне отдельного элемента ту же преемственность показывают работы Baumgartner + Uriu, прежде всего проект Apertures. Здесь проём рассматривается как динамический элемент, реагирующий на меняющиеся условия среды. Приём простой: берут базовый элемент, вырывают из привычного контекста и систематически изучают его функциональные и композиционные возможности. Это прямо восходит к аналитической педагогике Баухауса, где отдельному элементу (цвету, фактуре) уделяли огромное внимание. Параметрические инструменты лишь добавили этому аналитическому импульсу вычислительной глубины, немыслимой раньше [18].

Архитектура Нормана Фостера (от башни Мэри-Экс до кампуса Apple Park) показывает, что параметрические методы могут обслуживать и прямое продолжение модернистской эстетики. Фостер вычислительно оптимизирует аэродинамику, энергопотребление, конструктивные схемы, но результаты облекает в геометрически ясные, конструктивно честные формы. Это прямая ветвь хай-тека, а значит, и позднего модернизма. Исследователи подмечают: в таких проектах «параметрическое моделирование используется для незаметного поглощения сложности» [15]. Модернистская эстетика получает возможность работать там, где нужна куда более тонкая настройка, чем та, что была доступна зодчим XX века. В итоге корпус современных построек не рвёт с модернистским наследием. Он продолжает его: разнообразно и жизнеспособно, в цифровой среде. Системность, рациональность и технологическая обоснованность никуда не делись, они остаются фундаментом профессии.

5. Изменение роли архитектора в цифровую эпоху

Параметрические методы меняют не только инструменты, но и ставят под вопрос саму роль автора в проектировании. Раньше процесс был линейным: эскиз, чертёж, макет, рабочая документация. Теперь он зациклен. Архитектор создаёт алгоритмическую модель, проверяет её поведение при разных входных данных, уточняет правила и снова проверяет, и так до тех пор, пока результат не станет приемлемым. Весь путь от замысла до анализа уже построенного здания делается цифровым. Архитектор получает колоссальный

контроль. Но одновременно на него ложится и возросшая сложность системы, которой он управляет [12].

Главный сдвиг – это переход от прямого рисования формы к роли того, кто придумывает правила и ограничения. В генеративных методах архитектор не вычерчивает конкретный объём. Он задаёт параметры, взаимосвязи, критерии оптимизации, а итоговую геометрию вычисляет компьютер. Одни исследователи говорят о превращении «дизайнера» в «системостроителя». Авторство никуда не пропадает, а смещается на уровень постановки задачи, выбора существенных параметров и толкования полученных результатов [9].

Расширение возможностей тянет за собой запрос на новые компетенции. Обычного архитектурного образования уже мало. Требуется хотя бы начальное алгоритмическое мышление, понимание логики визуального программирования и азов анализа данных. Этот сдвиг не совсем новый: что-то похожее случилось столетием раньше. В Баухаусе архитектор перестал быть ремесленником, который работает с материей напрямую, и стал проектировщиком, передающим замыслы через чертёж и машинное производство. Параметрическая эпоха делает следующий шаг: чертёж заменяется алгоритмом, станок – цифровым контроллером. Но фундаментальная идея модернизма (союз искусства и технологии) сохраняется [8; 19].

Параметрические инструменты ещё и теснее сводят архитектора со смежниками: конструкторами, инженерами, экологами. Модель становится общей платформой, на которой решение любого участника мгновенно отражается на всей системе. Это по-новому оживляет модернистскую идею синтеза искусств и наук под началом архитектуры, ту самую, которую Гропиус называл центральной задачей Баухауса [20].

Новые возможности выталкивают наружу и этические вопросы. Критики предупреждают: есть риск, что параметризм превратится в формальную игру, потеряет социальный смысл, который был важен для модернистского проекта с его вниманием к массовому потребителю. Примерно те же аргументы выдвигались против интернационального стиля в середине XX века. Выходит, две эпохи связывает не только преемственность достижений, но и общность проблем [21]. Смена роли архитектора в цифровую эпоху представляет собой не разрыв с модернистской традицией, а её продолжение. Системность, рациональность, технологическая обоснованность остаются. Профессия просто выходит на очередной виток.

Заключение

Параметрическая архитектура не отменяет идей Баухауса. Она их продолжает, только уже в цифровой среде. Функциональность по-прежнему диктует форму. Связь с технологиями своего времени никуда не делась.

Системное мышление тоже на месте. Всё это не исчезло, а скорее обрело другую глубину и другой масштаб.

Баухаус отвечал на вызовы индустриальной эпохи через стандартизацию и массовое производство. Параметризм держит ответ перед постфордистским информационным обществом, используя массовую кастомизацию, адаптивность, сложные сети взаимосвязей. Алгоритмы сейчас играют ту же роль, что в 1920-е играли станки и новые материалы. Они расширяют поле возможностей и позволяют управлять куда более запутанными системами.

Роль архитектора меняется, но центр тяжести профессии никуда не сместился. По-прежнему всё упирается в человека. Именно способность не потерять за алгоритмами живых людей, удержать социальные и этические ориентиры не даёт порваться связи с гуманистической линией Баухауса. Выходит, алгоритм становится новым материалом. Пожалуй, модернизм не исчез. Он просто сменил материал: от стали и бетона – к алгоритмам.

Список литературы:

1. Gropius W. The New Architecture and the Bauhaus / W. Gropius; transl. by P. Morton Shand. – London: Faber & Faber, 1925. – 112 p.
2. Bauhaus journal 1926–1931: facsimile edition / ed. by Lars Müller. – Zürich: Lars Müller Publishers, 2019. – 320 p.
3. Itten J. Design and Form: The Basic Course at the Bauhaus / J. Itten. –London: Thames & Hudson, 1963. – 136 p.
4. Oxman R. Digital Architecture as a Challenge for Design Pedagogy: Theory, Knowledge, Models and Medium / R. Oxman // Design Studies. – 2008. – Vol. 29, No. 2. – P. 99–120. DOI: 10.1016/j.destud.2007.12.003
5. Frampton K. Modern Architecture: A Critical History / K. Frampton. – 4th ed. – London: Thames & Hudson, 2007. – 424 p.
6. Schumacher P. Parametricism as Style: Parametricist Manifesto / P. Schumacher // Paper presented at The Darkside Club, 11th Architecture Biennale. – Venice, 2008.
7. Schumacher P. The Autopoiesis of Architecture. Vol. 1 / P. Schumacher. – London: John Wiley & Sons, 2010. – 478 p.
8. Caetano I. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design / I. Caetano, A. Leitão // Frontiers of Architectural Research. – 2020. – Vol. 9, No. 2. – P. 287–300. DOI: 10.1016/j.foar.2019.12.008 EDN: EQZZRI
9. Федчун Д.О. Сравнительный анализ методов параметрического, информационного и генеративного архитектурного проектирования / Д. О. Федчун, Р. Е. Тлустый // Вестник Инженерной школы ДВФУ. –2018. – № 1(34). – С. 103–115. DOI: 10.5281/zenodo.1196721 EDN: YTOKKA
10. Kieran S. Refabricating Architecture / S. Kieran, J. Timberlake. – New York: McGraw-Hill, 2004. – 176 p.
11. Kolarevic B. Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing / ed. by B. Kolarevic. – New York: Taylor & Francis, 2003. – 314 p.
12. Boychenko K. Philosophy of parametric design in interactive architecture framework / K. Boychenko // Architecture and Art. – 2017.

13. Zavoleas Y. From Cartesian to Topological Geometry: Challenging Flatness in Architecture / Y. Zavoleas, M. Taylor // Nexus Network Journal. – 2019. – Vol. 21, No.1. – P. 5–18. DOI: 10.1007/s00004-018-0414-8 EDN: PDOIEN

14. Миндиашвили М. З. Формообразование и графика в архитектурных концепциях «нового модернизма» / М. З. Миндиашвили // Architecture and Modern Information Technologies. – 2018. – № 4(45). – С. 294–304.

15. Oxman R. Thinking difference: theories and models of parametric design thinking / R. Oxman // Design Studies. – 2017. – Vol. 52. – P. 4–39. DOI: 10.1016/j.destud.2017.06.001

16. Lynn G. Animate Form / G. Lynn. – New York: Princeton Architectural Press, 1999. – 204 p.

17. Shah M. et al. The Visual Perception of Residential Buildings: Le Corbusier's Modernism and Zaha Hadid's Parametric Architecture / M. Shah [et al.] // Architecture and Planning Journal. – 2022. – Vol. 28, No. 1. – P. 1–18.

18. Oktan S. Thinking on the Correlation Between Bauhaus and Computational Design Education / S. Oktan, S. Vural // Journal of Contemporary Urban Affairs. – 2019. – Vol. 3, No. 3. – P. 27–38. DOI: 10.25034/ijcua.2019.v3n3-3

19. Forlano L. Bauhaus Futures / ed. by L. Forlano, M. W. Steenson, M. Ananny. – Cambridge, MA: MIT Press, 2019. – 376 p. DOI: 10.7551/mitpress/12044.001.0001

20. Geddert F. Algorithmic Architecture: Arbeiten zu parametrischen Entwurfsmethoden an der Bauhaus-Universität Weimar / F. Geddert, R. König. – Weimar: Books on Demand, 2011. – 168 p.

21. Samalavičius A. Ideology as Geometry: A Note on Parametricism and Its Theoretical Foundations / A. Samalavičius // Symmetry: Culture and Science. – 2020. – Vol. 31, No. 3. – P. 353–364. DOI: 10.26830/symmetry_2020_3_353 EDN: STOWYD

УДК 72.01:502.1

Пушкарева С. А.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

«АРХИТЕКТУРА ВОЗНИКНОВЕНИЯ» КАК НОВАЯ ПАРАДИГМА РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОТ ТЕОРИИ СЛОЖНЫХ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ К ПРАКТИКЕ (НА ПРИМЕРЕ BLUE GARDEN)

Аннотация. Статья посвящена концепции «архитектуры возникновения» (Architecture of Emergence) как теоретической и методологической основе регенеративного проектирования. На основе анализа работ Майкла Вайнштока и теории сложных адаптивных систем показано, что переход от статичного объектного мышления к проектированию живых, самоорганизующихся систем радикально переопределяет роль архитектора и логику формообразования. Практическая реализация этих принципов рассмотрена на примере проекта Blue Garden — гибридной регенеративной системы, объединяющей биомимикрию, вычислительный дизайн и циркулярные материалы. Демонстрируется, как абстрактные идеи эмерджентности, метаболизма и агентности живых организмов обретают архитектурную форму и задают новую профессиональную идентичность.

Ключевые слова: архитектура возникновения, эмерджентность, сложные адаптивные системы, регенеративное проектирование, биомимикрия, вычислительный дизайн, циркулярные материалы, Blue Garden.

Введение

Климатический кризис и исчерпание линейной ресурсной модели вынуждают архитектуру пересматривать базовые установки. Привычные стратегии «устойчивости» и «минимизации вреда» уже не достаточны: требуется переход к регенеративному проектированию, в котором здания и ландшафты мыслятся не как статичные объекты, а как живые, адаптивные системы, включённые в биосферные циклы и способные к самоорганизации. Концептуальным фундаментом этого перехода выступает «архитектура возникновения» (Architecture of Emergence), заимствующая идеи из биологии развития, кибернетики и теории сложных адаптивных систем.

В центре статьи — ключевой вопрос: как теория «архитектуры возникновения» (прежде всего в интерпретации Майкла Вайнштока) переопределяет роль архитектора и методологию проектирования для создания регенеративных систем? Для ответа на него рассмотрены теоретические основы эмерджентной архитектуры, выявлены принципы регенеративного проектирования в этой парадигме, проведён сравнительный

анализ традиционного и эмерджентного подходов, а также детально изучен проект Blue Garden как практическая реализация данных идей.

Обзор литературы

Проблематика эмерджентности в архитектуре получила развитие на пересечении нескольких дисциплинарных полей. Фундаментальный вклад принадлежит Майклу Вайнштоку, который в книге The Architecture of Emergence: The Evolution of Form in Nature and Civilisation (2010) проследил, как принципы самоорганизации, эволюции и сложных адаптивных систем могут быть перенесены в архитектурное проектирование [1]. Параллельно Джон Фрейзер в новаторской работе An Evolutionary Architecture (1995) заложил основы генеративного подхода, рассматривая архитектурную форму как результат вычислительной эволюции [2]. Ахим Менгес и Майкл Хензель развили направление «морфоэкологического дизайна», в котором материал и форма понимаются как производные от потоков энергии и материи [3, 4].

Принципы регенеративного проектирования систематизированы Джоном Т. Лайлом [5] и развиты Биллом Ридом в концепции «живых систем» [6]. Влияние цифровых технологий на изменение роли архитектора исследовано Бранко Коларевичем [7] и Ривкой Оксман, которая показала переход от дизайнера-творца к «дизайнеру правил» [8]. Критическую перспективу предлагает А. Самалавичюс, указывающий на риск формализации и утраты социального содержания в эмерджентных подходах [9]. Вместе эти работы образуют многомерный контекст, в котором теоретическая концепция эмерджентности встречается с задачами регенеративного дизайна.

Методы исследования

Методология базируется на сравнительно-теоретическом и проектно-аналитическом подходах. Изучены первоисточники по архитектуре возникновения (Вайншток, Фрейзер), регенеративному дизайну и вычислительному проектированию. Проведено сравнение традиционной архитектурной парадигмы и эмерджентной по критериям: понимание формы, метод формообразования, роль архитектора, отношение к ресурсам и времени. Визуальный и морфологический анализ проекта Blue Garden выполнен на основе проектной документации и описаний, реконструируемых по материалам лаборатории Emergent Architecture Lab.

1. Теоретические основы «архитектуры возникновения»: эмерджентность и сложные адаптивные системы

Традиционная архитектура оперирует детерминированными моделями: автор задаёт финальную форму, материал и сценарий использования, а здание сопротивляется среде и со временем деградирует. «Архитектура возникновения» предлагает принципиально иной взгляд — рассматривать архитектурный объект как сложную адаптивную систему (complex adaptive

system, CAS), способную к самоорганизации, обучению и эволюции в непрерывном взаимодействии с контекстом.

Ключевое понятие — эмерджентность, то есть появление у системы новых свойств, не присущих её отдельным элементам и не выводимых из их простой суммы. В биологии это проявляется в росте колоний кораллов, формировании термитников, паттернах миграции стай — структурах, возникающих без центрального плана за счёт локальных правил и обратных связей. Майкл Вайнштok доказывает, что форма и поведение архитектурной системы не должны «назначаться» сверху, а должны «выращиваться» в цифровой среде с учётом множества агентов и динамических параметров — климата, потоков энергии, материалов, социальных практик [1].

Теоретический каркас «архитектуры возникновения» базируется на трёх фундаментальных концептах: Самоорганизация — способность системы спонтанно упорядочиваться без внешнего управляющего центра. В архитектуре это означает проектирование не жёсткой геометрии, а полей правил и материальных протоколов, внутри которых структура адаптируется к возмущениям среды. Нелинейность и чувствительность к начальным условиям — малые изменения локальных параметров способны радикально менять глобальное поведение. Архитектор управляет начальными условиями и граничными ограничениями, а не тотально контролирует все детали. Эволюция и коэволюция — форма понимается как временная стабилизация в потоке обмена веществом, энергией и информацией. Здание не завершается в момент постройки, а продолжает «становиться» вместе с экосистемой и сообществом.

2. Особенности регенеративного проектирования в эмерджентной парадигме

Парадигма «архитектуры возникновения» естественно смыкается с принципами регенеративного дизайна, требующего не просто минимизировать ущерб, а активно восстанавливать экосистемы и увеличивать «жизнеспособность» места. В этой связке выделяются несколько методологических принципов, отличающих эмерджентное регенеративное проектирование от традиционного «зелёного» строительства.

Проектирование метаболизма, а не объекта. Регенеративная эмерджентная архитектура оперирует не статичными энергоэффективными оболочками, а целостными метаболическими циклами: вода, углерод, органика, энергия циркулируют внутри системы и обмениваются с окружением. Проект становится инфраструктурой потоков, где каждый элемент выполняет несколько функций и участвует в каскадном использовании ресурсов.

Биологическая интеграция и агентность живых организмов. Живые организмы (микроводоросли, мицелий, растения, бактерии) рассматриваются

не как декоративное дополнение, а как активные агенты, чья коллективная деятельность порождает эмерджентные качества — очистку воздуха, производство биомассы, аккумуляцию энергии. Архитектурная форма проектируется как среда обитания для этих агентов.

Вычислительное проектирование как платформа эволюции. Параметрические и генеративные алгоритмы позволяют симулировать поведение популяций агентов и искать устойчивые конфигурации — «аттракторы», удовлетворяющие множеству противоречивых критериев. Компьютер из инструмента визуализации превращается в «движок эволюции»: форма не рисуется, а находится в процессе вычислительного поиска [2, 7].

Циркулярная материальность и морфогенез материалов. Материалы должны быть способны к самосборке, реконфигурации или биоразложению. Проектируются не только геометрические параметры, но и микроструктура материала (ориентация волокон, плотность), управляющая его свойствами — аналогично тому, как растут природные материалы [3].

Все эти особенности требуют от архитектора перехода от мышления застывшими формами к мышлению временными паттернами и динамическими устойчивостями. Ключевой вопрос — не «как выглядит объект», а «как система ведёт себя во времени и какие новые свойства возникают при её взаимодействии с контекстом».

3. Сравнение традиционного и эмерджентного подходов в архитектуре

Сравнение двух проектных парадигм — традиционной (статичной) и эмерджентной (процессуальной) — позволяет увидеть не просто смену инструментов, а трансформацию самой онтологии архитектуры.

Традиционное проектирование опирается на детерминированную логику: архитектор создаёт финальный образ, фиксирует геометрию, материал и сценарий эксплуатации. Здание понимается как изолированный объект, противостоящий внешней среде, а любые изменения расцениваются как отклонения от авторского замысла или деградация. Форма задаётся композиционно, с опорой на статичные модульные сетки и унификацию, что соответствует индустриальной логике массового производства.

Эмерджентный подход исходит из того, что среда, пользователи и климат находятся в постоянном изменении, а само здание должно обладать способностью адаптироваться и эволюционировать. Форма не навязывается, а «выращивается» в результате вычислительных процессов, имитирующих природные морфогенезы. Вместо жёсткой унификации используется массовая кастомизация: каждый элемент может быть уникальным без потери технологичности. Если модернистская системность базировалась на

повторении одинакового, эмерджентная — на запрограммированном разнообразии и корреляции элементов.

Функциональность также переосмысляется. Традиционный функционализм сводит функцию к утилитарному назначению помещения; эмерджентное проектирование расширяет это понятие, включая в него экологические, метаболические и социальные процессы. Архитектура перестаёт быть застывшей декорацией и становится временной стабилизацией в потоке обмена веществом и энергией. Это сближает её с живыми организмами, где форма и функция неразрывны и постоянно коэволюционируют.

4. Анализ проекта Blue Garden: биомимикрия, вычислительный дизайн и циркулярные материалы

Проект Blue Garden, разработанный в рамках лаборатории Emergent Architecture Lab (с опорой на методологию Вайнштока), представляет собой регенеративный павильон и публичный ландшафт, задуманный как «живой организм». Он демонстрирует, как абстрактные концепты эмерджентности обретают материальную плоть.

Биомимикрия: коралловый риф как модель. Морфологической и функциональной метафорой Blue Garden выступает коралловый риф — одна из самых продуктивных экосистем планеты. Подобно рифу, павильон формируется наслоением модульных элементов, чья геометрия оптимизирована под локальные условия освещённости и течения воздуха. Оболочка дифференцирована: пористая в зонах естественной вентиляции, уплотнённая в зонах затенения. На уровне экосистемной функции Blue Garden служит убежищем биоразнообразия в городской ткани.

Вычислительный дизайн: выращивание формы. Форма павильона не создавалась в CAD-редакторе, а «выращивалась» в среде агентного моделирования. Виртуальные «полипы» действовали по простым правилам: стремиться к свету, избегать перегрева, максимизировать площадь контакта с воздушным потоком. Эволюционная оптимизация (multi-objective evolutionary algorithm) в течение тысяч поколений выявила аттракторы — стабильные морфологические семейства, лучшие из которых были отобраны по критериям продуктивности встроенных биореакторов и пешеходного комфорта.

Циркулярные материалы и живые оболочки. Несущая структура выполнена из биокомпозита на основе мицелия, выращенного на сельскохозяйственных отходах. Мицелиальные блоки способны к самовосстановлению микротрещин при контролируемой влажности и полностью разлагаются в конце жизненного цикла, становясь почвенным субстратом. Фасадные панели представляют собой фотобиореакторы с культурой цианобактерий: в процессе фотосинтеза они поглощают CO_2, генерируют кислород и производят биомассу. Плотность колонии меняется в

зависимости от освещённости, что создаёт динамический визуальный эффект — фасад «дышит» в унисон с солнцем, меняя прозрачность и оттенок. Замкнутый водный цикл — дождевая вода собирается, фильтруется через живые корни и используется для охлаждения павильона — завершает метаболический контур.

5. Изменение роли архитектора в условиях эмерджентного проектирования

Эмерджентная регенеративная парадигма фундаментально меняет роль архитектора. В традиционной модели процесс линеен: эскиз, чертёж, рабочая документация, авторский надзор. Архитектор является автором фиксированной формы и несёт ответственность за её неизменность. В эмерджентной модели проектирование становится циклическим: архитектор создаёт алгоритмическую среду (набор правил, параметров, критериев), запускает вычислительный процесс, анализирует поведение системы и итеративно уточняет условия, пока не возникает приемлемый аттрактор.

Происходит переход от прямого рисования формы к роли «дизайнера правил» и «системостроителя» [8]. Авторство не исчезает, а смещается на уровень постановки задачи, выбора существенных параметров и интерпретации результатов. Такой сдвиг требует новых компетенций: алгоритмического мышления, понимания основ биологии и экологии, способности работать в междисциплинарных командах, где биологи, программисты и инженеры объединены общей цифровой моделью. Это напоминает идею синтеза искусств и наук, которую Вальтер Гропиус провозглашал центральной задачей Баухауса, только реализованную на новом технологическом витке.

Вместе с тем возрастает и ответственность архитектора. Критики эмерджентного подхода, в частности А. Самалавичюс, предупреждают об опасности формальных игр и утраты социального содержания, что перекликается с критикой интернационального стиля в середине XX века [9]. Поэтому новая роль требует не только технологической, но и этической осознанности: архитектор должен удерживать гуманистические ориентиры, проектируя не просто «живые системы», а среды, служащие человеку и экосистеме одновременно.

Заключение

«Архитектура возникновения» формирует новую парадигму регенеративного проектирования, в которой здания и ландшафты понимаются как живые, адаптивные системы, способные к самоорганизации и коэволюции с природой. Теория сложных адаптивных систем, перенесённая Вайнштоком и его последователями на архитектурную почву, переопределяет роль архитектора: из создателя статичных объектов он превращается в дизайнера эволюционных правил и метаболических протоколов. Методология

проектирования становится непрерывным параметрическим диалогом с живыми системами и вычислительными моделями.

Проект Blue Garden демонстрирует практическую реализуемость этих принципов через синтез биомимикрии, вычислительного дизайна и циркулярных материалов. Вместе с тем выявлены существенные ограничения, связанные с нормативной базой, требованием постоянного обслуживания живых компонентов и необходимостью междисциплинарной подготовки архитектора. Тем не менее, потенциал направления — создание архитектуры, которая дышит, адаптируется и возрождается вместе с природой, — делает его одним из самых перспективных ответов на вызовы экологического кризиса.

Список литературы:

1. Weinstock M. The Architecture of Emergence: The Evolution of Form in Nature and Civilisation / M. Weinstock. – Chichester: John Wiley & Sons, 2010. – 280 p.
2. Frazer J. An Evolutionary Architecture / J. Frazer. – London: Architectural Association, 1995. – 127 p.
3. Menges A. Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design / A. Menges (ed.) // Architectural Design. – 2012. – Vol. 82, No. 2. – P. 14–21. DOI: 10.1002/ad.1374
4. Hensel M. Performance-Oriented Architecture: Rethinking Architectural Design and the Built Environment / M. Hensel. – London: John Wiley & Sons, 2013. – 152 p. DOI: 10.1002/9781118640630
5. Lyle J. T. Regenerative Design for Sustainable Development / J. T. Lyle. – New York: John Wiley & Sons, 1994. – 338 p.
6. Reed B. Shifting from ‘sustainability’ to regeneration / B. Reed // Building Research & Information. – 2007. – Vol. 35, No. 6. – P. 674–680.
7. Kolarevic B. Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing / B. Kolarevic (ed.). – New York: Taylor & Francis, 2003. – 320 p.
8. Oxman R. Thinking difference: theories and models of parametric design thinking / R. Oxman // Design Studies. – 2017. – Vol. 52. – P. 4–39. DOI: 10.1016/j.destud.2017.06.001
9. Samalavičius A. Ideology as Geometry: A Note on Parametricism and Its Theoretical Foundations / A. Samalavičius // Symmetry: Culture and Science. – 2020. – Vol. 31, No. 3. – P. 353–364. DOI: 10.26830/symmetry_2020_3_353 EDN: STOWYD
10. Turner J. S. The Extended Organism: The Physiology of Animal-Built Structures / J. S. Turner. – Cambridge, MA: Harvard University Press, 2000. – 256 p.
11. Benyus J. M. Biomimicry: Innovation Inspired by Nature / J. M. Benyus. – New York: Harper Perennial, 2002. – 320 p.
12. De Landa M. Material Evolvability and Variability / M. DeLanda // Architectural Design. – 2012. – Vol. 82, No. 2. – P. 118–123.
13. Addington M. Smart Materials and New Technologies: For the Architecture and Design Professions / M. Addington, D. Schodek. – Oxford: Architectural Press, 2005. – 256 p.
14. Oxman N. Material Ecology / N. Oxman // Architectural Design. – 2015. – Vol. 85, No. 5. – P. 100–107. DOI: 10.1002/ad.1961

ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ..... 3

Керимова Бибихаджар 3

ГИБРИДНЫЕ ВЕТРО-СОЛНЕЧНЫЕ УСТАНОВКИ: ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ НЕСТАБИЛЬНОЙ ПОГОДЫ..... 3

Керимова Бибихаджар 9

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ..... 9

Гадамов Дурдымырат[1], Деряева Мая[2]..... 17

АГРОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ БАМИИ В УСЛОВИЯХ ТУРКМЕНИСТАНА 17

Чарыбердиев Какагелди, Ёлдашов Гуванч..... 26

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОПУЛЯЦИОННОЙ ГЕНЕТИКИ В СОХРАНЕНИИ ЧИСТОКРОВНОЙ АХАЛТЕКИНСКОЙ ПОРОДЫ 26

Якубу Шараф-Дин..... 33

РАННИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ: ВЫСОКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ ВОЛН И ОЦЕНКЕ ИНТЕНСИВНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФИЗИЧЕСКИ-ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ..... 33

Егоров Д. М..... 44

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ НЕСМЕШИВАЮЩЕГОСЯ ДВУХФАЗНОГО ВЫТЕСНЕНИЯ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ 44

Тан Кэрань, Ван Бошуай, Цзэн Ясинь 67

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВОДООХРАННЫХ И ПОЧВОЗАЩИТНЫХ ФУНКЦИЙ ЭКОСИСТЕМ НА СКЛОНОВЫХ ЗЕМЛЯХ ХОЛМИСТЫХ РАЙОНОВ 67

Захаров В. Ю..... 73

НЕЛИНЕЙНЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ЗАПЫЛЁННОЙ ПЛАЗМЕ С УЧЁТОМ ЗАРЯДКИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ И ПОТОКОВ ИОНОВ 73

Жабяк А. Р..... 78

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ВЕРХНЕКОСТИНСКОГО РЕЗЕРВУАРА СУХОТУНГУССКОГО ВАЛА И ФАКТОРЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛОВУШЕК УГЛЕВОДОРОДОВ..... 78

Zoalfkar Ali Deeb..... 91

TOWARDS HIGH-QUALITY ARABIC KNOWLEDGE GRAPHS: IMPROVING ENTITY AND RELATION EXTRACTION PERFORMANCE 91
Киорогло М. А., Кошкин А. К. 97
ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ФУНДАМЕНТОВ АЭРОПОРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ Г. УЛАН-УДЭ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ НАГРУЗОК ОТ НОВЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ 97
Анищенко А. А., Калицкий А. В., Колос С. А. 103
ВЛИЯНИЕ РАЗВИТИЯ ИГРОВЫХ ДВИЖКОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ВИДЕОИГР 103
Москалюк М. В., Солдатова С. С., Синкина В. Е. 114
ДИЕГЕТИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОТОКА В ВИДЕОИГРАХ 114
Fajr Afasha 119
NOISE-ROBUST ESTIMATION IN DC MOTORS 119
Гусарова Е. В., Кузнецова А. О. 125
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РИСКОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОТОКОЛОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАЗВЕРТЫВАНИЯ И ОБНАРУЖЕНИЯ СОСЕДЕЙ В МУЛЬТИ-ВЕНДОРНЫХ КОММУТИРУЕМЫХ СЕТЯХ 125
Титов Е. А. 136
ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИНДИКАТОРОВ ПРОИЗВОДСТВА КОРПУСОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОТАЦИИ IDEF0 136
Доулетов И. И., Блинов К. Р. 143
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ АКСИАЛЬНО-ПЛУНЖЕРНОГО НАСОСА ПЕРЕМЕННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ 143
Бабкин И. М., Петухов С. В., Кришьянис М. В., Хвиюзов М. А. 148
УДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ 148
Солехзода Сабринахон 153
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИБРИДНЫХ ДЕРЕВО-ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СИСТЕМ В СЕЙСМООПАСНЫХ РАЙОНАХ 153
Поваров М. В., Афанасьев Д. А., Васин И. И. 161

ПРОЕКТИРОВАНИЕ «ЧЕСТНОЙ СЛОЖНОСТИ» В ХАРДКОРНЫХ ИГРАХ: ТЕЛЕГРАФИРОВАНИЕ АТАК И КАДРЫ НЕУЯЗВИМОСТИ 161
Кочемиров М. А., Ушаков Д. П., Козлов А. В. 167
СРАВНЕНИЕ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ОЦЕНКЕ ЛЕКСИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ АНГЛИЙСКОГО ЯЗЫКА ПО УРОВНЮ CEFR 167
Оселедцева И. В., Стрибижева Л. И., Гаценко М. В., Коновалов Д. В. 177
ЭНОКРАСИТЕЛЬ ИЗ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ ВИНОДЕЛИЯ: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ 177
Копытков И. В. 184
УЛУЧШЕНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ 184
Бутенко В. А., Фанаберов Д. И., Нечаев М. А. 193
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АРХИТЕКТУРНОГО ПАТТЕРНА ENTITY COMPONENT SYSTEM В СРАВНЕНИИ С КЛАССИЧЕСКИМ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ПОДХОДОМ В ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ИГРОВЫХ СИСТЕМАХ 193
Сюй Лухань, Комзалов В. И. 201
ТЕХНОЛОГИИ V2X И BIG DATA-ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ МОСКВЫ И ПЕКИНА: ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ 201
Полетаев Б. Г. 206
АДАПТАЦИЯ ДИФФУЗИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ 3D-ОБЪЕКТОВ И СЦЕН 206
Сабиров Д. С. 219
ОПТИМИЗАЦИЯ РУКОПОЖАТИЯ TLS ЧЕРЕЗ СЖАТИЕ СЕРТИФИКАТОВ RFC 8879 НА ОСНОВЕ IDECO NGFW 219
Шошков Н. О., Гечис Владас 225
ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ИНТЕГРАЦИОННЫХ ТЕСТОВЫХ СЦЕНАРИЕВ НА ОСНОВЕ BPMN-МОДЕЛЕЙ 225
Смоляков С. А. 231
АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОВЫХ АВТОБУСОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ 231
Гильманов А. А., Даянов Д. Р., Исхаков М. У., Кузьмин Н. Д. 240

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ BPMN И ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ПРЕДПРИЯТИЙ 240
Мишина Ю. В. 245
СРЕДСТВА РЕГИСТРАЦИИ КОЛЕБАНИЙ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ И ОЦЕНКИ ИХ ВЛИЯНИЯ НА ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ 245
Брагина Е. А., Рунова В. В. 254
МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-АУДИТА КОНФИГУРАЦИЙ СЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ CISCO ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИЗНАКОВ УЯЗВИМОСТИ SMART INSTALL (CVE-2018-0171) 254
Брагина Е. А., Рунова В. В. 266
ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ КОНФИГУРАЦИИ ОС АЛЬТ ТРЕБОВАНИЯМ CIS BENCHMARKS СРЕДСТВАМИ LYNIS: МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ АУДИТА И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗАЩИЩЁННОСТИ 266
Байрамуков А. М. 282
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ДУБЛЯЖА ВИДЕОКОНТЕНТА С СОХРАНЕНИЕМ ОРИГИНАЛЬНОГО ГОЛОСА 282
Бельчиков М. Д., Абзалетдинов А. И. 287
RIPv2-FLOOD КАК ГИБРИДНЫЙ ВЕКТОР АТАКИ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕЩЁННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛОСКОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ И ТАБЛИЦУ МАРШРУТИЗАЦИИ СЕТЕВЫХ ПЛАТФОРМ 287
Панасенков М. Н. 296
ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ КОНТЕНТА TELEGRAM-КАНАЛОВ: СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ 296
Филатов А. Д. 301
ПРОТИВОДЫМНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ В ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ: ОТ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ К СОГЛАСОВАННОМУ ФУНКЦИОНИРОВАНИЮ 301
Степанов Р.В., Хорт М.Ю. 308
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АТАКИ CAM-TABLE OVERFLOW И МЕТОДОВ ЕЁ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ 308
АРХИТЕКТУРА И ДИЗАЙН 321
Капустин Е. С., Башкиров В. И. 321

МЕТОДЫ И ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВ ПАРКОВ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВИДОВ СПОРТА НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ 321
Кожевникова Ю. Б. 339
БОРЬБА ЗА БЕЗОПАСНОСТЬ ВО ДВОРЕ ЖИЛОЙ ЗОНЫ. (ПЕШЕХОДНЫЕ СЦЕНАРИИ И ТРАЕКТОРИИ) 339
Кожевникова Ю. Б. 347
ОСТАНОВКА НЕВОЗМОЖНА: СИСТЕМНАЯ НЕХВАТКА УЛИЧНОЙ МЕБЕЛИ КАК МАРКЕР НЕУВАЖЕНИЯ К ПЕШЕХОДУ 347
Рузманов Е. А. 355
ПРИМЕНЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ КРУЖАЛЬНЫХ КУПОЛОВ В СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ 355
Пушкарева С. А. 360
BAUHAUS И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ АРХИТЕКТУРА: ПРОДОЛЖАЕТСЯ ЛИ МОДЕРНИЗМ В ЦИФРОВУЮ ЭПОХУ? 360
Пушкарева С. А. 370
«АРХИТЕКТУРА ВОЗНИКНОВЕНИЯ» КАК НОВАЯ ПАРАДИГМА РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОТ ТЕОРИИ СЛОЖНЫХ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ К ПРАКТИКЕ (НА ПРИМЕРЕ BLUE GARDEN) 370
ОГЛАВЛЕНИЕ 377