

МОЛОДОЙ УЧЁНЫЙ

ISSN 2072-0297

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



23 2026
ЧАСТЬ I

16+

Молодой ученый

Международный научный журнал

№ 23 (626) / 2026

Издается с декабря 2008 г.

Выходит еженедельно

Главный редактор: Ахметов Ильдар Геннадьевич, кандидат технических наук

Редакционная коллегия:

Жураев Хусниддин Олтинбоевич, доктор педагогических наук (Узбекистан)
Иванова Юлия Валентиновна, доктор философских наук
Каленский Александр Васильевич, доктор физико-математических наук
Кошербаева Айгерим Нуралиевна, доктор педагогических наук, профессор (Казахстан)
Куташов Вячеслав Анатольевич, доктор медицинских наук
Лактионов Константин Станиславович, доктор биологических наук
Сараева Надежда Михайловна, доктор психологических наук
Абдрасилов Турганбай Курманбаевич, доктор философии (PhD) по философским наукам (Казахстан)
Авдеюк Оксана Алексеевна, кандидат технических наук
Айдаров Оразхан Турсункожаевич, кандидат географических наук (Казахстан)
Алиева Тарана Ибрагим кызы, кандидат химических наук (Азербайджан)
Ахметова Валерия Валерьевна, кандидат медицинских наук
Бердиев Эргаш Абдуллаевич, кандидат медицинских наук (Узбекистан)
Брезгин Вячеслав Сергеевич, кандидат экономических наук
Данилов Олег Евгеньевич, кандидат педагогических наук
Дёмин Александр Викторович, кандидат биологических наук
Дядюн Кристина Владимировна, кандидат юридических наук
Желнова Кристина Владимировна, кандидат экономических наук
Жуйкова Тамара Павловна, кандидат педагогических наук
Игнатова Мария Александровна, кандидат искусствоведения
Искаков Руслан Маратбекович, кандидат технических наук (Казахстан)
Калдыбай Кайнар Калдыбайулы, доктор философии (PhD) по философским наукам (Казахстан)
Кенесов Асхат Алмасович, кандидат политических наук
Коварда Владимир Васильевич, кандидат физико-математических наук
Комогорцев Максим Геннадьевич, кандидат технических наук
Котляров Алексей Васильевич, кандидат геолого-минералогических наук
Кузьмина Виолетта Михайловна, кандидат исторических наук, кандидат психологических наук
Курпаяниди Константин Иванович, доктор философии (PhD) по экономическим наукам (Узбекистан)
Кучерявенко Светлана Алексеевна, кандидат экономических наук
Лескова Екатерина Викторовна, кандидат физико-математических наук
Макеева Ирина Александровна, кандидат педагогических наук
Матвиенко Евгений Владимирович, кандидат биологических наук
Матроскина Татьяна Викторовна, кандидат экономических наук
Матусевич Марина Степановна, кандидат педагогических наук
Мусаева Ума Алиевна, кандидат технических наук
Насимов Мурат Орленбаевич, кандидат политических наук (Казахстан)
Паридинова Ботагоз Жаппаровна, магистр философии (Казахстан)
Прончев Геннадий Борисович, кандидат физико-математических наук
Рахмонов Азизхон Боситхонович, доктор педагогических наук (Узбекистан)
Семахин Андрей Михайлович, кандидат технических наук
Сенцов Аркадий Эдуардович, кандидат политических наук
Сенюшкин Николай Сергеевич, кандидат технических наук
Султанова Дилшода Намозовна, доктор архитектурных наук (Узбекистан)
Титова Елена Ивановна, кандидат педагогических наук
Ткаченко Ирина Георгиевна, кандидат филологических наук
Федорова Мария Сергеевна, кандидат архитектуры
Фозилов Садриддин Файзуллаевич, кандидат химических наук (Узбекистан)
Яхина Асия Сергеевна, кандидат технических наук
Ячинова Светлана Николаевна, кандидат педагогических наук

Международный редакционный совет:

Айрян Заруи Геворковна, кандидат филологических наук, доцент (Армения)
Арошидзе Паата Леонидович, доктор экономических наук, ассоциированный профессор (Грузия)
Атаев Загир Вагитович, кандидат географических наук, профессор (Россия)
Ахмеденов Кажмурат Максutowич, кандидат географических наук, ассоциированный профессор (Казахстан)
Бидова Бэла Бертовна, доктор юридических наук, доцент (Россия)
Борисов Вячеслав Викторович, доктор педагогических наук, профессор (Украина)
Буриев Хасан Чутбаевич, доктор биологических наук, профессор (Узбекистан)
Велковска Гена Цветкова, доктор экономических наук, доцент (Болгария)
Гайич Тамара, доктор экономических наук (Сербия)
Данатаров Агахан, кандидат технических наук (Туркменистан)
Данилов Александр Максимович, доктор технических наук, профессор (Россия)
Демидов Алексей Александрович, доктор медицинских наук, профессор (Россия)
Досманбетов Динар Бакбергенович, доктор философии (PhD), проректор по развитию и экономическим вопросам (Казахстан)
Ешиев Абдыракман Молдоалиевич, доктор медицинских наук, доцент, зав. отделением (Кыргызстан)
Жолдошев Сапарбай Тезекбаевич, доктор медицинских наук, профессор (Кыргызстан)
Игисинов Нурбек Сагинбекович, доктор медицинских наук, профессор (Казахстан)
Кадыров Кутлуг-Бек Бекмурадович, доктор педагогических наук, и.о. профессора, декан (Узбекистан)
Каленский Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор (Россия)
Козырева Ольга Анатольевна, кандидат педагогических наук, доцент (Россия)
Колпак Евгений Петрович, доктор физико-математических наук, профессор (Россия)
Кошербаева Айгерим Нуралиевна, доктор педагогических наук, профессор (Казахстан)
Курпаяниди Константин Иванович, доктор философии (PhD) по экономическим наукам (Узбекистан)
Куташов Вячеслав Анатольевич, доктор медицинских наук, профессор (Россия)
Кыят Эмине Лейла, доктор экономических наук (Турция)
Лю Цзюань, доктор филологических наук, профессор (Китай)
Малес Людмила Владимировна, доктор социологических наук, доцент (Украина)
Нагервадзе Марина Алиевна, доктор биологических наук, профессор (Грузия)
Нурмамедли Фазиль Алигусейн оглы, кандидат геолого-минералогических наук (Азербайджан)
Прокопьев Николай Яковлевич, доктор медицинских наук, профессор (Россия)
Прокофьева Марина Анатольевна, кандидат педагогических наук, доцент (Казахстан)
Рахматуллин Рафаэль Юсупович, доктор философских наук, профессор (Россия)
Ребезов Максим Борисович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Россия)
Сорока Юлия Георгиевна, доктор социологических наук, доцент (Украина)
Султанова Дилшода Намозовна, доктор архитектурных наук (Узбекистан)
Узаков Гулом Норбоевич, доктор технических наук, доцент (Узбекистан)
Федорова Мария Сергеевна, кандидат архитектуры (Россия)
Хоналиев Назарали Хоналиевич, доктор экономических наук, старший научный сотрудник (Таджикистан)
Хоссейни Амир, доктор филологических наук (Иран)
Шарипов Аскар Калиевич, доктор экономических наук, доцент (Казахстан)
Шуклина Зинаида Николаевна, доктор экономических наук (Россия)

На обложке изображена Чимаманда Нгози Адичи (1977), нигерийская писательница.

Будущей писательнице дали имена Чимаманда и Нгози, что с языка народа игбо, к которому она принадлежит, переводится как «Мой Бог не ошибается (неисчерпаем)» и «Благословение». Она родилась в Энугу и была пятой в семье из шести детей в городе Нсукка на юге Нигерии, где в Университете Нигерии ее отец Джеймс Нвое Адичи работал профессором статистики и проректором. Мать Грейс Айфеома работала регистратором-секретарем в этом же учебном заведении и была первой женщиной на этом посту за всю его историю.

Еще школьницей Адичи слагала стихи и в 1997 году опубликовала поэтический сборник «Решения». С детства она слушала рассказы отца и матери о гражданской войне в Нигерии (1967–1970), во время которой те лишились всего своего имущества и потеряли родителей, и решила, что напишет об этом. В шестнадцать лет Чимаманда Нгози написала пьесу «За любовь к Биафре», вышедшую в свет в 1998 году. Решающее влияние на молодую писательницу оказали романы Чинуа Ачебе и Лей Камара «И пришло разрушение» и «Африканский ребенок». В результате она изменила тему произведений на африканскую и негритянскую.

Чимаманда полтора года изучала медицину и фармакологию в Университете Нигерии. Но осознав, что медицина — не ее призвание, в 1996 году уехала учиться в США. Прослушав курс лекций по коммуникации и политологии в Дрексельском университете в Филадельфии, она перевелась в Университет Восточного Коннектикута, чтобы жить поближе к сестре Айджеоми, у которой была медицинская практика в Ковентри. В 2001 году Чимаманда с отличием окончила этот вуз и получила степень бакалавра.

Вскоре она стала магистром в области литературы в университете Джонса Хопкинса, а также магистром искусств, специализируясь в африканистике в Йельском университете.

Четыре ее произведения — «Ты в Америке», «Дерево в бабушкином саду», «Этот утренний харматан» и «Американское посольство» — были отмечены различными престижными номинациями и премиями.

В Коннектикуте она приступила к своему первому роману «Пурпурный гибискус», в котором повествование ведется от имени главной героини — пятнадцатилетней Камбили Ачике, которая вместе с братом по имени Джаджа страдает от произвола отца-бизнесмена, самодура и католического святоши. Действие произведения развивается на фоне событий в постколониальной Нигерии. Семья

Ачике разваливается, но в итоге все заканчивается счастливо. Роман был издан в 2003 году и в течение следующих двух лет был удостоен двух литературных премий стран Содружества наций в категориях «Лучшая первая книга (Африка)» и «Лучший дебют (в целом)» и еще семи наград, включая номинацию на литературную премию «Оранж» (2004).

В названии ее второй прозаической книги «Половина желтого солнца» отражен один из мотивов флага Биафры — непризнанного государства, существовавшего на территории Нигерии во время гражданской войны в Нигерии 1967–1970 годов. В этом романе показано, как межэтнический конфликт народов хауса и игбо, а затем и эта война повлияли на судьбы главных героев — сельского юноши Угву, его хозяина Оденигбо и двух сестер-близнецов Оланны и Кайнене. Роман был награжден семью премиями, а в 2013 году по мотивам «Половины желтого солнца» был снят одноименный фильм. В конце того же года роман отметили на Международном кинофестивале в Торонто.

В 2009 году вышла книга Чимаманды Адичи «Штука у тебя на шее» — сборник из двенадцати рассказов, преимущественно на нигерийскую и американскую тематику. Один из них, «Холм прыгающей обезьяны», содержит элементы автобиографии. В рассказе «Американское посольство» показана женщина, которая добивается убежища в США, но в конце концов отказывается от этого намерения, потому что не хочет, чтобы ее сына убили ради визы.

В 2010 году Адичи вместе с другими авторами вошла в список «Двадцатка моложе сорока», составленный журналом «Нью-Йоркер» в категории «Художественная литература». В следующем году ее рассказ «Потолок» вошел в список «Лучшие американские рассказы».

В 2013 году она опубликовала свой третий роман, «Америка». Этот труд был удостоен двух наград — премии газеты «Чикаго трибюн» в категории «Художественная литература» и премии Национального круга книжных критиков в категории «Художественная литература».

Адичи неоднократно выступала с докладами на лекциях и конференциях. На конференции TED писательница выступила с докладом «Опасность отдельно взятого рассказа», в Гилдхолле (Лондон) она прочитала лекцию на тему культурных связей между странами Содружества «Читать реалистичную литературу — значит искать человечность», на конференции TEDx Адичи произнесла речь «Мы все должны быть феминистами».

*Информацию собрала ответственный редактор
Екатерина Осянина*

СОДЕРЖАНИЕ

ХИМИЯ

Агаева О. Б.

Совершенствование процесса получения хлорметила 1

Гелдиева Х.

Изучение процесса синтеза винилхлорида гидрохлорированием концентрированного ацетилена 2

Номеровченко У. С., Дудченко И. Ю.

Стехиометрия сложных реакций: метод матриц для уравнивания уравнений 4

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Агулов В. В., Хильченко В. Е.

Магнитный поток в обмотке статора электродвигателя 7

Басова К. П.

Возможности СВЧ-зондирования для неинвазивного контроля гликемии 15

Войнов Е. С.

Влияние трещиностойкости на аддитивные материалы 19

Гончаров М. А., Гуреев М. С.

Разработка и апробация автономного мобильного шасси для складской логистики на базе операционной системы ROS 2 20

Крайнюченко А. Л.

Применение теории нечеткой логики для устранения недостатков в работе регулятора уровня в парогенераторе на АЭС с реактором ВВЭР-1000 22

Мухамедов А. А., Ерназаров Ш. Н., Исаев Ф. Ф., Абдуразаков Х. Т.

Исследование вторичных источников энергии с использованием компьютерных технологий 24

Сигаев А. Н., Федоров А. Е., Чех Н. И., Куликов Д. Е.

Исследование влияния цветных металлов в составе глины Корниловского месторождения для защиты от электромагнитных волн 28

Сиренко А. Г.

Использование робототехнических средств при ремонте и обслуживании тракторов 32

Чистохин П. А., Жидко Е. А.

Анализ проектной документации как ключевой фактор, обеспечивающий безопасное функционирование опасных производственных объектов 35

АРХИТЕКТУРА, ДИЗАЙН И СТРОИТЕЛЬСТВО

Алексеев Р. М.

Совершенствование технологических решений возведения малоэтажных зданий 39

Алексеев Р. М.

Технико-экономический и теплотехнический анализ эффективности применения CLT-панелей в перекрытиях малоэтажных зданий 42

Демидова В. С.

Особенности реализации проектов строительства объектов комфорт-класса (на примере квартала «Федерация» в г. Екатеринбурге) 45

Колмагорцев И. С.

Сравнительный анализ результатов расчетного моделирования предварительного напряжения элементов стальной фермы с параллельным направлением поясов 48

Ларионова Е. Н.

Эмоционально-художественное моделирование архитектурно-градостроительного облика малых и средних городов: методология и три подхода 52

Ларионова Е. Н.

Исторический метод формирования
архитектурно-градостроительного облика:
от ретроспективных законов к современной
практике55

Лосев К. А.

Влияние объемной доли и водопоглощения
керамзитового песка на водопотребность
легких смесей для строительной 3D-печати58

Пичков С. Д.

Количественная оценка механической
совместимости материалов при ремонте
бетонных конструкций.....61

Пыхтина О. А.

Развитие инженерно-сетевой
инфраструктуры в городе Екатеринбург64

ХИМИЯ

Совершенствование процесса получения хлорметила

Агаева Огулширин Байрамовна, студент магистратуры

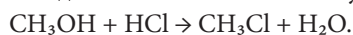
Научный руководитель: Небыков Денис Николаевич, кандидат химических наук, доцент
Волгоградский государственный технический университет

В статье описывается промышленный процесс получения хлористого метила (метилхлорида). Предложен способ модернизации установки путем изменения подготовки сырья и реорганизации реакторного узла. Данное решение направлено на комплексное решение ключевых технологических проблем действующего производства.

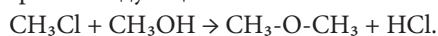
Ключевые слова: метилхлорид, метанол, жидкофазное гидрохлорирование.

Хлористый метил служит ключевым полупродуктом в промышленном производстве смол, эластомеров, силиконов [1–4] и гербицидов [5]. Он используется в качестве растворителя при изготовлении бутылкаучука, очистке бензина, а также как метилирующий и хлорирующий реагент в органическом синтезе. Решение актуально на фоне высокой потребности в продукте в РФ и прогнозируемого роста спроса из-за расширения локальной производственной базы.

Целевой продукт (метилхлорид) образуется в результате одностадийной реакции между метиловым спиртом и хлористым водородом, протекающей в жидкой фазе. Взаимодействие компонентов осуществляется по схеме:



Наряду с основной реакцией, также возможно протекание побочной реакции, образования диметилового эфира по следующей схеме:



Для ингибирования данного побочного процесса синтез осуществляют в избытке хлороводорода, поддерживая мольное соотношение $\text{HCl}:\text{CH}_3\text{OH}$ (3,2–4):1.

Для увеличения производительности и выхода целевого продукта на основе патента [6] предложена модернизация схемы производства, включающая изменение стадии подготовки сырья и реорганизацию реакторного блока. Последний предлагается реализовать в виде каскада из трех барботажных реакторов. В аппарате первой ступени синтез протекает при незначительном избытке хлористого водорода. В реактор второй ступени вводится дополнительный поток метанола, что обеспечивает избыток спирта по отношению к HCl. Данное технологическое решение позволяет достичь практически полной конверсии хлористого водорода при сохранении высокой степени превращения метанола. В результате сокращается

объем образующихся отходов, упрощается и интенсифицируется стадия подготовки сырья. Кроме того, исключение необходимости многоступенчатой отмывки хлористого метила от кислых примесей существенно упрощает стадию выделения целевого продукта.

Современные технологические разработки сосредоточены на создании усовершенствованных систем, включающих противотокковые реакционные схемы с непрерывным отводом водной фазы [7], применение хлорида кальция для разрушения азеотропа соляной кислоты [8], нейтрализацию кубовой жидкости известковым молоком до оптимальных значений pH 6,5–8, а также замену традиционного стального оборудования на графитовое для повышения коррозионной стойкости и увеличения межремонтных пробегов [9].

Процессы на основе метанола подразделяются на газофазные и жидкофазные. Газофазные процессы характеризуются температурным диапазоном 150–400 °C и используют различные катализаторные системы, включая оксид алюминия при 250–350 °C и давлении 2–4 атм [10], цеолиты с определенным соотношением $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ [9], а также хлорид цинка на активированном угле при 150–250 °C. Однако эти методы сопровождаются существенными недостатками, такими как высокая энергоемкость, значительное образование побочных продуктов и необходимость постоянной регенерации катализатора.

Преимущества жидкофазных некаталитических процессов заключаются в значительном снижении энергозатрат на 30–40 % по сравнению с газофазными методами, возможности организации замкнутых реагентных циклов, отсутствии необходимости использования и регенерации катализатора, а также существенном улучшении экологических показателей за счет минимизации образования отходов. Современная тенденция в развитии произ-

водств метилхлорида ориентирована на создание энергоэффективных и экологически безопасных жидкофазных процессов, обеспечивающих высокую селективность и возможность успешной интеграции в комплексные химические производства.

Реализация данного способа позволяет существенно упростить стадию подготовки сырья и, в то же время, требует некоторого изменения структуры реакторного

узла. Данное направление совершенствования позволит максимально повысить конверсию хлористого водорода (99,2 %) при сохранении высокой конверсии метанола (97 %), сократить количество отходов производства, снизить энергетические затраты и расход реагентов повысить экологичность производства в целом, значительно упростить стадию выделения (отсутствие необходимости многоступенчатой отмывки хлористого метила от HCl).

Литература:

1. Weissmehl K., Arpe H.-J. Industrial Organic Chemistry. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1997.
2. Becerra A. M., Luna A. E. C., Ardisson D. E., Ponzi M. I. Kinetics of the Catalytic Hydrochlorination of Methanol to Methyl Chloride // Industrial & Engineering Chemistry Research. 1992. Vol. 31, № 4. P. 1040–1045.
3. Bercic G., Levec J. Intrinsic and Global Reaction Rate of Methanol Dehydration over γ -Al₂O₃ Pellets // Industrial & Engineering Chemistry Research. 1992. Vol. 31, № 4. P. 1035–1040.
4. McInroy A. R., Winfield J. M., Dudman C. C., Jones P., Lennon D. The development of a new generation of methyl chloride synthesis catalyst // Faraday Discussions. 2016. Vol. 188. P. 467–479.
5. Future Market Insights. Chloromethane Market — Global Industry Analysis, Size and Forecast, 2015 to 2025.
6. Пат.5917099. Япония Способ получения хлористого метила / Tomomi Narita, Hiroyuki Kobayashi, Yukinori Satoh, Yoshihiro Shirota; заяв. и пат.обл. Shin-Etsu Chemical Co., Ltd. — опубл. 29.06.99.
7. Пат. 2079478 Российская Федерация, МПК С 07 С 19/03. Способ получения метилхлорида [Текст] / Ершов О. Л., Гезалов А. А., Поливанов А. Н.; заявитель и патентообладатель Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений. — № 94001088/04, заявл. 12.01.94; опубл. 20.05.97.
8. Пат. 2504534 С1 Российская Федерация. МПК С07С 19/03, С07С 17/16. Способ получения метилхлорида / Кочурков А. А., Гезалов А. А., Каменская Е. А., Стороженко П. А., Поливанов А. Н., Даутова Е. В.; патентообладатель ФГУП «ГНИИХТЭОС». — № 2012156459/04; заявл. 26.12.2012; опубл. 20.01.2014.
9. Пат. 2494695 Франция, МПК С 07 С 17/16, С 07 С 17/00, С 07 С 19/03, С
10. 07 F 7/18, С 08 G 77/06. Способ одновременного получения органсилоксана и хлористого метила [Текст] / Ichikawa Kesazi, Shimizu Mutsuo, Habata Kiichi; заявитель Shinetsu Chemical co. — № 8122030; заявл. 25.11.91; опубл. 28.05.92.
11. Пат. 5057973 Япония, МПК С 07 С 19/02. Способ получения хлористых алкилов [Текст] / Tomomi Narita, Hiroyuki Kobayashi, Yukinori Satoh, Yoshihiro Shirota; заявитель и патентообладатель Shin-Etsu Chemical Co., Ltd. — № 08579312, заявл. 12.05.2002, опубл. 20.08.2003.

Изучение процесса синтеза винилхлорида гидрохлорированием концентрированного ацетилен

Гелдиева Хурма, студент магистратуры

Научный руководитель: Латышова Снежана Евгеньевна, кандидат химических наук, доцент
Волгоградский государственный технический университет

В статье автором проведен аналитический обзор методов получения винилхлорида, предложена замена токсичного катализатора на экологически безопасный аналог.

Ключевые слова: винилхлорид, ацетилен, гидрохлорирование, катализатор, золото, экологичность.

Введение

Винилхлорид (хлористый винил, C_2H_3Cl) является одним из важнейших крупнотоннажных продуктов основного органического синтеза. Около 99,6 % производимого в мире винилхлорида направляется на получение

поливинилхлорида (ПВХ) и различных сополимеров. Поливинилхлорид благодаря своим уникальным свойствам — химической стойкости, электроизоляционным характеристикам, долговечности и относительно низкой стоимости — нашел широкое применение в строительстве, машиностроении, электротехнической промышлен-

ности, производстве труб, пленок, линолеума и медицинских изделий [1].

В промышленности известно несколько принципиально различных подходов к синтезу винилхлорида: гидрохлорирование ацетилена, дегидрохлорирование 1,2-дихлорэтана (как термическое, так и в жидкой фазе в присутствии щелочей), прямое хлорирование этилена, сбалансированный метод (сочетание хлорирования и оксихлорирования этилена), а также комбинированные способы на основе ацетилена и этилена [1]. Каждый из методов имеет свои технологические и экономические особенности.

В Российской Федерации долгое время основным способом получения винилхлорида было гидрохлорирование ацетилена, что было связано с наличием сырьевой базы и отработанной технологией. Однако данный процесс обладает рядом серьезных недостатков: использование высокотоксичного катализатора (дихлорид ртути, или сулема, на активированном угле), его малый срок службы (6–12 месяцев), летучесть при температурах выше 180 °С, а также жесткие требования к чистоте сырья. Присутствие влаги в ацетилене приводит к образованию ацетальдегида и снижению селективности.

Таким образом, модернизация процесса гидрохлорирования ацетилена является актуальной научно-технической задачей. Целью данной работы является совершенствование технологии синтеза винилхлорида путем использования концентрированного ацетилена и замены ртутного катализатора на нертутный аналог на основе золота и меди.

1. Аналитический обзор методов получения винилхлорида

Сравнительный анализ литературных и патентных источников показывает, что в мировой практике доминирующим является сбалансированный метод из этилена, включающий стадии прямого хлорирования этилена (получение 1,2-дихлорэтана), оксихлорирования этилена (также с получением дихлорэтана) и последующего термического крекинга 1,2-дихлорэтана с образованием винилхлорида и хлороводорода [2, 3]. Этот метод позволяет эффективно использовать хлор и имеет высокую селективность, однако требует сложного аппаратного оформления и значительных капитальных затрат.

Комбинированный метод на основе ацетилена и этилена занимает промежуточное положение: хлороводород, выделяющийся при пиролизе 1,2-дихлорэтана, используется для гидрохлорирования ацетилена. Это позволяет снизить себестоимость продукта на 6–7 % по сравнению с чисто ацетиленовым процессом [4, 5]. Тем не менее, в условиях наличия дешевого ацетилена (например, от электрокрекинга природного газа или карбидным методом) прямое гидрохлорирование остается экономически привлекательным.

Что касается самого гидрохлорирования ацетилена, то оно может осуществляться как в жидкой, так и в газовой фазе. Жидкофазные процессы (в водных растворах хлоридов ртути или меди) отличаются лучшим съемом тепла, но имеют низкую конверсию за один проход (40–90 %) и существенные сложности с разделением продуктов [6]. Газофазный процесс на твердых катализаторах является более простым технологически и обеспечивает высокие показатели: конверсию до 94–98 % и селективность до 96–99 %. Однако именно в этом варианте наиболее остро стоит проблема токсичности ртутного катализатора.

В последние годы активно ведутся исследования по созданию ртутьсвободных каталитических систем. Наибольших успехов удалось достичь с катализаторами на основе золота (Au). Наиболее перспективными, по данным [7, 8], являются биметаллические системы Au-Co(III)-Cu(II). Установлено, что катионы Co(III) и Cu(II) стабилизируют высокую степень окисления Au, предотвращают его восстановление и ингибируют отложение кокса. Такой катализатор (1 % Au, 3 % Co, 1 % Cu на активированном угле) показал конверсию ацетилена 99,7 % и селективность 99,9 % в течение 6513 ч непрерывной работы (табл. 1).

2. Кинетика и механизм

Реакция гидрохлорирования ацетилена на гетерогенных катализаторах описывается кинетическим уравнением второго порядка: первый порядок по ацетилену и первый по хлороводороду. Механизм, предложенный на основе DFT-расчетов и экспериментальных данных [9], включает следующие стадии:

1. π -Координация ацетилена к активному центру Au(III).
2. Координация молекулы HCl.

Таблица 1. Сравнение традиционного и предлагаемого катализаторов гидрохлорирования ацетилена

Параметр	Традиционный (HgCl ₂ /C)	Предлагаемый (Au-Co-Cu/C)
Сырье	Газы пиролиза	Конц. ацетилен
Температура, °С	90–180	150
Соотношение C ₂ H ₂ :HCl (об.)	1: 0,98	1: 1,1
Конверсия ацетилена, %	94	98,9–99,7
Селективность, %	96	98–99,9
Срок службы катализатора	6–12 мес.	6000 ч
Класс опасности	1 (чрезвычайно опасный)	3 (умеренно опасный)

3. Образование переходного состояния с разрывом связи H-Cl и синхронным присоединением Cl к атому углерода ацетилена, а H — к хлорид-лиганду.

4. Образование σ -связи C-Au (винильное производное золота).

5. Протодеаурирование (отщепление Au с образованием винилхлорида).

6. Безопасность и экологичность

Предлагаемая модернизация позволяет существенно снизить экологическую нагрузку. Катализатор на основе золота имеет класс опасности 3 (по CuCl_2) вместо 1 для ртутного. Отсутствие летучей сулемы исключает загрязнение атмосферы и позволяет безопасно регенерировать отработанный катализатор.

Важным дополнительным фактором является использование концентрированного ацетилена, что снижает количество побочных продуктов (ацетальдегида и хлорпроизводных). Основные вредные вещества (винилхлорид, хлороводород, ацетилен) контролируются газоанализа-

торами, а рабочие зоны оснащаются приточно-вытяжной вентиляцией и противогазами соответствующих марок (А, В, СО).

Заключение

Проведен аналитический обзор методов получения винилхлорида, показаны преимущества и недостатки гидрохлорирования ацетилена.

Предложена замена экологически опасного ртутного катализатора на биметаллический катализатор Au-Co(III)-Cu(II)/C, обеспечивающий конверсию ацетилена до 99 % и селективность до 99 % при 150 °С.

Дана оценка безопасности предложенного решения, показано снижение класса опасности катализатора и уменьшение выбросов токсичных веществ.

Полученные результаты могут быть использованы при модернизации существующих производств винилхлорида на предприятиях, использующих ацетиленовый метод.

Литература:

1. Лебедев, Н. Н. Химия и технология основного органического и нефтехимического синтеза. — М.: Химия, 1988. — 592 с.
2. Non-mercury catalytic acetylene hydrochlorination over spherical activated-carbon-supported Au-Co(III)-Cu(II) catalysts / Haiyang Zhang [et al.] // Journal of Catalysis. — 2014. — № 316. — С. 141–148.
3. Капкин, В. Д. Технология органического синтеза. — М.: Химия, 1987. — 400 с.
4. Плате, Н. А. Основы химии и технологии мономеров. — М.: Наука, 2002. — 69 с.
5. Промышленные хлорорганические продукты: справочник / под ред. Л. А. Ошина. — М.: Химия, 1978. — 656 с.
6. Зильберман, Е. Н. Получение и свойства поливинилхлорида. — М.: Химия, 1968. — 432 с.
7. Тимофеев, В. С. Принципы технологии основного органического и нефтехимического синтеза. — М.: Высш. шк., 2003. — 536 с.
8. Шмидт, А. В. Кинетика и катализ. — Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. — 90 с.
9. Malta, Grazia et al. Deactivation of a Single-Site Gold-on-Carbon Acetylene Hydrochlorination Catalyst: An X-ray Absorption and Inelastic Neutron Scattering Study // ACS Catalysis. — 2018. — С. 8493–8505.

Стехиометрия сложных реакций: метод матриц для уравнивания уравнений

Номеровченко Ульяна Сергеевна, студент;

Дудченко Инна Юрьевна, студент

Научный руководитель: Суяргулова Лилия Александровна, старший преподаватель

Оренбургский государственный университет имени В. А. Бондаренко

В статье рассматривается метод матриц как эффективный инструмент для уравнивания сложных химических реакций. Предложенная методика основана на применении линейной алгебры для решения задач стехиометрии, что позволяет алгоритмически и безошибочно реализовать принцип материального баланса для реакций любой сложности. В работе подробно описывается алгоритм применения матричного метода, включающий составление системы линейных уравнений, формирование матрицы состава, поиск ядра матрицы и приведение коэффициентов к целочисленной форме. На конкретном примере реакции перманганата калия с соляной кислотой демонстрируется практическая реализация предложенного подхода.

Ключевые слова: матрица, реакции, стехиометрия, коэффициент, метод матриц.

Химические реакции представляют собой процессы перегруппировки атомов, строго подчиняющиеся фундаментальному закону сохранения массы вещества [1]. Согласно этому закону, суммарное количество атомов каждого элемента, вступивших в реакцию (реагенты), должно быть равно суммарному количеству атомов тех же элементов, образовавшихся в ходе реакции (продукты).

Ключевая задача стехиометрического анализа — корректная запись уравнения реакции путём нахождения целочисленных стехиометрических коэффициентов. Эти коэффициенты обеспечивают материальный баланс по всем химическим элементам.

Классический метод подбора коэффициентов, широко применяемый на базовом уровне обучения, демонстрирует приемлемую эффективность лишь при работе с простейшими реакциями (например, реакциями горения или кислотно-основными взаимодействиями). При переходе к сложным реакциям, окислительно-восстановительным процессам, многокомпонентным системам или реакциям с участием органических соединений — данный метод сталкивается с существенными методологическими ограничениями: высокая трудоёмкость расчётов, требующая многократного перебора вариантов; повышенный риск возникновения ошибок из-за большого числа учитываемых элементов.

Рассмотрим алгоритм метода матриц, который позволяет алгоритмически и безошибочно реализовать принцип материального баланса для любой химической реакции.

Метод матриц — строгий математический подход, позволяющий уравнивать реакции любой сложности с помощью линейной алгебры. Он особенно полезен для окислительно-восстановительных реакций с множеством участников, реакций в органической химии с длинными цепочками атомов и процессов с побочными продуктами.

Каждая химическая реакция представляет собой систему линейных уравнений, где неизвестные — стехиометрические коэффициенты перед веществами, уравнения — баланс атомов каждого элемента. Эту систему можно представить в матричной форме

$$A \cdot x = 0 \quad (1)$$

где: A — матрица состава (каждый столбец соответствует веществу, каждая строка — элементу); x — вектор стехиометрических коэффициентов; 0 — нулевой вектор (означает сохранение массы каждого элемента).

Пошаговый алгоритм:

1. Записать реакцию с формальными коэффициентами:



Составить матрицу состава A . Строки — элементы (K, Mn, O, H, Cl), столбцы — вещества:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -2 \\ 0 & 1 & -1 & -2 & -2 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

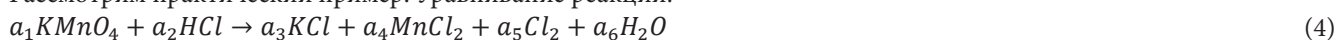
где положительные значения — атомы в реагентах; отрицательные значения — атомы в продуктах; нули — отсутствие элемента в веществе.

2. Найти ядро матрицы — множество векторов x , для которых $A \cdot x = 0$. Это даст соотношения между коэффициентами.

3. Привести коэффициенты к целым числам. Обычно один из коэффициентов принимают за 1, остальные выражают через него, затем домножают на общий знаменатель.

4. Проверить решение подстановкой в исходное уравнение.

Рассмотрим практический пример. Уравнивание реакции:



1. Запишем систему уравнений баланса атомов (таблица 1).

Таблица 1. Система уравнений баланса атомов

Элемент	Уравнение баланса атомов
Калий (K)	$a_1 = a_3$
Марганец (Mn)	$a_1 = a_4$
Кислород (O)	$4a_1 = a_6$
Водород (H)	$a_2 = 2a_6$
Хлор (Cl)	$a_2 = a_3 + 2a_4 + 2a_5$

1. Составим матрицу A (как рассмотрено выше).

2. Решим систему $A \cdot x = 0$. Выразим все переменные через a_1 :

— Из уравнения K : $a_3 = a_1$

— Из уравнения Mn : $a_4 = a_1$

— Из уравнения O : $a_6 = 4a_1$

— Из уравнения H : $a_2 = 8a_1$

— Подставим в уравнение Cl: $8a_1 = a_1 + 2a_1 + 2a_5 \rightarrow 5a_1 = 2a_5 \rightarrow a_5 = \frac{5}{2}a_1$

3. Приведём к целым числам. Пусть $a_1 = 2$, тогда:

— $a_1 = 2$ (KMnO₄)

— $a_2 = 16$ (HCl)

— $a_3 = 2$ (KCl)

— $a_4 = 2$ (MnCl₂)

— $a_5 = 5$ (Cl₂)

— $a_6 = 8$ (H₂O)

4. Запишем окончательное уравнение:



Проверка:

— K: $2 = 2$

— Mn: $2 = 2$

— O: $8 = 8$

— H: $16 = 16$

— Cl: $16 = 2 + 4 + 10 = 16$

Баланс соблюдается.

Преимущества метода матриц: универсальность (работает для любых реакций, включая многостадийные процессы); автоматизация (легко реализуется в компьютерных программах (Python, MATLAB, Excel)) точность (исключает ошибки интуитивного подбора); масштабируемость (применим к реакциям с десятками веществ).

Метод матриц, обладая высокой эффективностью, имеет ряд существенных ограничений и сложностей практического применения. Прежде всего, решение очень больших систем уравнений требует привлечения специализированной вычислительной техники [4]. Кроме того, если ранг матрицы оказывается меньше числа неизвестных, система приобретает бесконечное множество решений, что вынуждает исследователя дополнительно накладывать ограничения — например, искать минимальный набор ненулевых коэффициентов. Важным методологическим ограничением является и то, что данный подход учитывает лишь стехиометрию реакции, полностью абстрагируясь от кинетических и термодинамических аспектов процесса.

Тем не менее метод матриц занимает фундаментальное место в современной химии и служит алгоритмической основой для целого ряда прикладных задач: от моделирования химических процессов в специализированном программном обеспечении до расчёта материальных балансов на промышленных производствах. Он незаменим при анализе сложных метаболических путей в биохимии и при построении кинетических моделей, где требуется первичная стехиометрическая проработка системы.

Таким образом, метод матриц — мощный инструмент для уравнивания химических реакций любой сложности. Он превращает химическую задачу в математическую, позволяя использовать строгие алгоритмы линейной алгебры. Овладев этим подходом, можно быстро и точно уравнивать даже самые сложные реакции, которые невозможно решить подбором коэффициентов вручную.

Литература:

1. Ахметов, С. Я. Общая и неорганическая химия: учебник для вузов / С. Я. Ахметов. — 1. — М.: Высшая шк., 2020. — 528 с. — Текст: непосредственный.
2. Габриелян, О. С. Химия. 8 класс / О. С. Габриелян, И. Г. Остроумов, С. А. Сладков. — 6. — М.: Просвещение, 2024. — 176 с. — Текст: непосредственный.
3. Химические уравнения и реакции. — Текст: электронный // Рувики: [сайт]. — URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Химические_уравнения_и_реакции
4. Долматов, К. Матрицы / К. Долматов. — Текст: электронный // Яндекс Образование: [сайт]. — URL: <https://education.yandex.ru/handbook/math/article/matritsi>

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Магнитный поток в обмотке статора электродвигателя

Агулов Владислав Владимирович, студент магистратуры
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Москва)

Хильченко Виталий Евгеньевич, студент
Нововоронежский политехнический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Введение

Широкое внедрение электроприводов с частотным регулированием в промышленности и инфраструктуре ставит новые задачи перед проектировщиками электрических машин. Для обеспечения энергоэффективности, соответствующей классам IE3 и IE4, требуется высокая точность расчета электромагнитных потерь в двигателе. Однако существующие методики часто дают заниженные значения добавочных потерь, что приводит к перегреву и снижению надежности оборудования при работе от преобразователей частоты.

В основе неточностей лежит неучет совместного влияния нескольких факторов, искажающих магнитный поток в статоре. Высшие гармоники тока, возникающие из-за несинусоидального питания, насыщение зубцовой зоны и реальная геометрия пазов в классических моделях либо игнорируются, либо учитываются упрощенно. Это приводит к существенному занижению добавочных потерь, что критично для современных высоконагруженных двигателей с частотным регулированием.

Целью настоящей работы является создание аналитико-численной методики, позволяющей с высокой точностью рассчитывать пространственно-временные гармоники магнитного потока в обмотке статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Разработанный подход должен обеспечить снижение погрешности определения добавочных потерь до 15 % по сравнению с классическими методами. Это позволит более достоверно оценивать тепловое состояние и энергоэффективность двигателей в реальных условиях эксплуатации.

Для достижения поставленной цели необходимо последовательно решить несколько задач. В первую очередь требуется провести обзор и классификацию факторов, вызывающих несинусоидальность распределения магнитного потока, включая высшие гармоники, скос пазов и насыщение. Затем следует разработать математическую модель магнитного поля, учитывающую нелинейные

свойства стали и реальную геометрию статора, и выполнить серию численных экспериментов методом конечных элементов с последующей верификацией на лабораторном стенде.

1. Факторы искажения магнитного потока

1.1. Обзор источников несинусоидальности магнитного потока в обмотках статора

Несинусоидальность магнитного потока в обмотках статора является следствием совокупного действия ряда факторов, которые традиционно подразделяют на три основные группы: конструктивные, электромагнитные и режимные. К конструктивным факторам относят зубчатость статора, которая приводит к пульсациям магнитной проводимости в воздушном зазоре, а также особенности геометрии пазов. Электромагнитные причины включают насыщение магнитопровода, при котором нелинейная зависимость между магнитной индукцией и напряженностью поля искажает форму кривой потока, и нелинейность вольт-амперной характеристики стали, что проявляется в гистерезисе и вихревых токах. Режимные факторы, такие как изменение нагрузки и питающего напряжения, также вносят вклад в искажение, изменяя степень насыщения и условия перемagnetивания. Особое значение для анализа искажений имеет учет нелинейных свойств магнитопровода, который может быть выполнен с помощью различных аппроксимаций. В частности, для построения систем регулирования синхронных машин часто применяются методы локальных кривых и усредненной характеристики намагничивания. Как отмечается в литературе, «наиболее пригодными для построения систем регулирования явнополюсных синхронных машин представляются методы локальных кривых и усредненной характеристики намагничивания. Данные методы сравнительно просты и вместе с тем обладают достаточной для практики точностью расчетов» [14, с.120]. Таким об-

разом, корректный выбор метода аппроксимации является ключевым для адекватного описания электромагнитных процессов в двигателе.

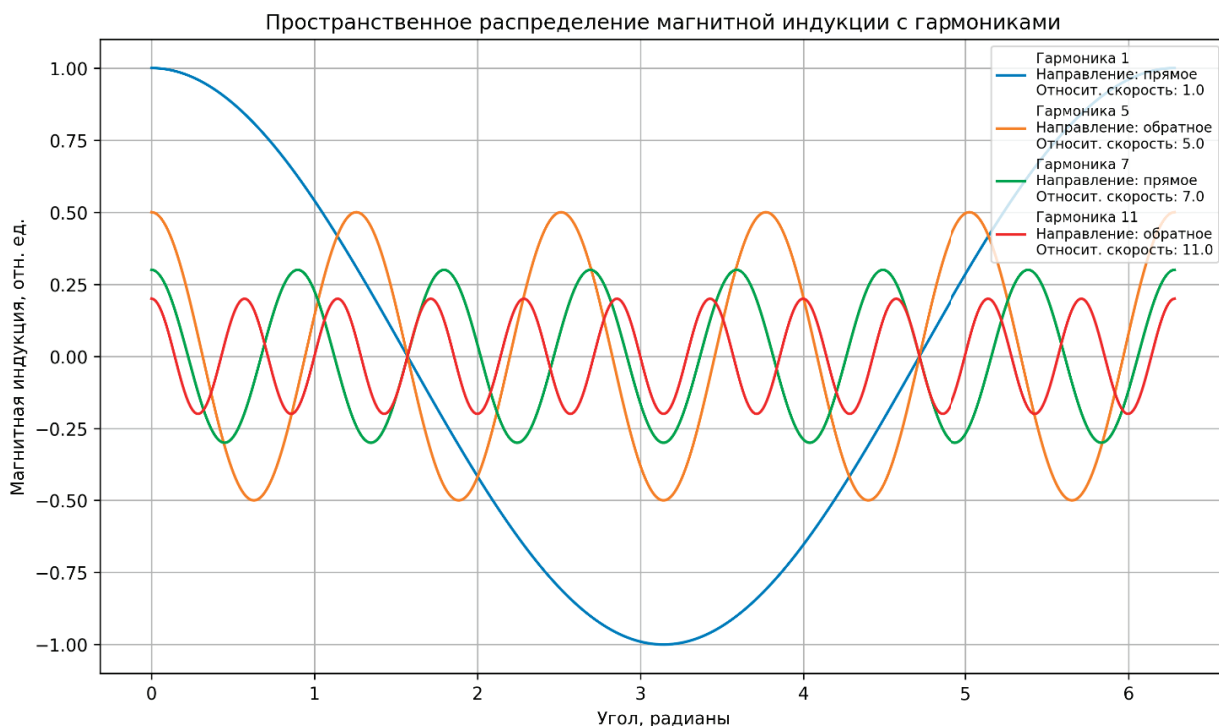
Конструкция обмотки статора, в частности ее распределенный характер и применение укороченного шага, является внутренним источником высших пространственных гармоник магнитодвижущей силы (МДС). Идеальная синусоидальная МДС может быть получена лишь при теоретически бесконечно тонком проводнике, сосредоточенном в одной паре пазов, что на практике нереализуемо. Распределение обмотки по нескольким пазам и укорочение шага, хотя и улучшают форму кривой МДС, одновременно порождают спектр высших гармонических составляющих, которые накладываются на основную волну поля. Эти пространственные гармоники, вращаясь с различными скоростями, искажают результирующее распределение магнитного потока в воздушном зазоре и индуцируют дополнительные ЭДС и токи в обмотках.

Внешним, независимым от конструкции двигателя источником несинусоидальности магнитного потока является форма питающего напряжения. Современные системы электропривода, использующие широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) от частотных преобразователей, формируют напряжение, далекое от идеальной синусоиды. Высокочастотные составляющие напряжения ШИМ индуцируют в обмотках статора токи высших временных гармоник, которые, в свою очередь, создают пульсирующие магнитные поля. Эти поля накладываются на основное поле, вызывая дополнительные искажения маг-

нитного потока и, как следствие, увеличение добавочных потерь в стали и обмотках. Таким образом, режим питания является критическим фактором, определяющим гармонический состав потока даже при идеальной конструкции двигателя.

1.2. Влияние высших гармоник тока на пространственное распределение магнитного поля

Высшие временные гармоники тока, генерируемые, например, при питании электродвигателя от преобразователя частоты, создают в воздушном зазоре дополнительные бегущие волны магнитного поля. Эти волны имеют порядки, отличные от основной гармоники (порядок 1), причем частота вращения и направление каждой такой волны определяются номером гармоники тока. Так, гармоники порядка 5 формируют поле, вращающееся в обратном направлении относительно основной волны, что существенно усложняет картину поля. В результате наложения этих бегущих волн на основное поле формируется сложное пространственное распределение магнитной индукции, которое уже не является чисто синусоидальным. Скорость вращения поля каждой высшей гармоники пропорциональна частоте тока и обратно пропорциональна ее номеру, поэтому различные гармоники движутся с разными скоростями. Это приводит к появлению пульсаций результирующего магнитного потока, которые становятся источником дополнительных потерь и нежелательных эффектов.



Наличие высших гармоник тока приводит к тому, что результирующее магнитное поле в воздушном зазоре распределяется крайне неравномерно, особенно вблизи

пазов и на краях зубцов статора. В этих зонах магнитная индукция может локально возрастать или снижаться, создавая искажения пространственного профиля поля. Как

отмечается в литературе, «в результате обращения (5) и использования формы (4) формируется трехмерный массив значений магнитной индукции в локальных сечениях φ_j при различных значениях компонент imd и imq вектора токов намагничивания: $bm_j = f(\varphi_j, imd, imq)$ » [14, с.120]. Такая неравномерность поля непосредственно ухудшает форму кривой ЭДС, наводимой в обмотке статора, увеличивая содержание высших гармоник в напряжении и токе.

1.3. Роль пазового скоса и его влияние на гармонический состав магнитного потока

Скос пазов статора или ротора представляет собой конструктивный прием, направленный на ослабление высших пространственных гармоник магнитного поля. Физический принцип действия скоса основан на создании непрерывного сдвига фаз между элементарными ЭДС, индуцируемыми в проводниках обмотки вдоль оси машины. Этот сдвиг фаз приводит к тому, что результирующая ЭДС для гармоник высокого порядка оказывается значительно меньше, чем для основной гармоники, что эквивалентно пространственной фильтрации поля. Таким образом, скос пазов позволяет целенаправленно подавлять нежелательные гармонические составляющие, улучшая форму кривой магнитного потока в воздушном зазоре. Эффективность скоса как фильтра пространственных гармоник напрямую зависит от геометрических параметров машины, в частности, от угла локального сечения, который определяет вид нелинейных функций, описывающих характеристики намагничивания. Как отмечается в литературе, «коэффициенты $k_{i,j}$ здесь рассматриваются как нелинейные функции угла локального сечения φ_j , конкретный вид которых определяется геометрией явнополюсной машины» [14, с.120]. Это подчеркивает, что для адекватного учета влияния скоса необходимо рассматривать не только его номинальный угол, но и его взаимосвязь с конфигурацией магнитной системы, что особенно важно при проектировании машин с различной степенью явнополюсности.

Выбор оптимального угла скоса является критическим этапом проектирования, поскольку он определяет баланс между подавлением высших гармоник и сохранением энергетических характеристик машины. С одной стороны, правильно подобранный угол позволяет эффективно ослабить зубцовые гармоники, которые являются основным источником вибраций и добавочных потерь. С другой стороны, чрезмерное увеличение угла скоса приводит к снижению амплитуды основной гармоники потока, что эквивалентно уменьшению полезного потокосцепления, а также к росту потокосцепления рассеяния, что ухудшает энергетические показатели двигателя. Влияние геометрии на магнитные характеристики дополнительно иллюстрируется коэффициентом явнополюсности, который «представляет собой относительную разность наибольшего (по оси q) и наименьшего (по оси

d) магнитных сопротивлений линейных участков локальных контуров» [14, с.120], и его значение косвенно отражает эффективность применения скоса в машинах различных типов.

Влияние пазового скоса на гармонический состав магнитного потока проявляется в изменении амплитудно-частотной характеристики поля в рабочем зазоре, что принципиально важно для точного расчета потерь и вибраций. Скос, по сути, вносит дополнительную модуляцию в пространственное распределение магнитодвижущей силы, что приводит к перераспределению энергии между гармониками. Особую значимость этот эффект приобретает в тяговых и высокоскоростных электродвигателях, где спектр гармоник особенно богат, а требования к виброакустическим характеристикам и КПД крайне высоки. Таким образом, игнорирование влияния скоса при моделировании может привести к существенным ошибкам в оценке как добавочных потерь в стали, так и уровня электромагнитных шумов, что делает его обязательным элементом современных методик проектирования.

2. Моделирование магнитного поля статора

2.1. Математическое описание магнитной цепи с учетом нелинейных свойств стали

При математическом моделировании магнитного поля в обмотке статора электродвигателя учет нелинейности магнитных свойств ферромагнитных материалов является критически важным условием для получения достоверных результатов. В реальных режимах работы, особенно при насыщении стали, зависимость магнитной индукции B от напряженности H перестает быть линейной, что приводит к существенным искажениям распределения потока. Для адекватного отражения этого эффекта в расчетах необходимо использовать кривую намагничивания, которая описывает нелинейную связь между B и H для конкретной марки стали. На практике эта кривая часто аппроксимируется аналитическими функциями, например, полиномами или сплайнами, что позволяет интегрировать ее в схему замещения магнитной цепи для последующего численного решения. В рамках данной работы для аппроксимации кривой намагничивания применяется кусочно-линейная интерполяция, обеспечивающая достаточную точность при относительно невысокой вычислительной сложности. Такой подход позволяет представить нелинейное магнитное сопротивление каждого участка магнитной цепи в виде табличной функции от потокосцепления. Как отмечается в литературе, «игнорирование нелинейности стали приводит к погрешности в определении распределения поля до 20–30 % в режимах, близких к номинальным» [5, с.112]. Следовательно, включение аппроксимированной кривой намагничивания в расчетную схему является обязательным условием для корректного моделирования магнитного потока в обмотке статора.

Для практической реализации учета нелинейных свойств разрабатывается разветвленная схема замещения магнитной цепи электродвигателя, которая включает в себя нелинейные магнитные сопротивления всех ключевых участков. К таким участкам относятся зубцово-пазовая зона, спинка статора, спинка ротора, а также воздушный зазор, сопротивление которого остается линейным. Формулировка уравнений магнитных контуров для такой схемы осуществляется на основе законов Кирхгофа для магнитных цепей: сумма МДС в замкнутом контуре приравнивается к сумме падений магнитного напряжения, а сумма магнитных потоков в узле равна нулю. При этом для нелинейных сопротивлений зависимость падения напряжения от потока задается через кривую намагничивания, что превращает систему линейных уравнений в нелинейную.

Решение полученной системы нелинейных уравнений магнитной цепи осуществляется с использованием итерационного метода, например, метода Ньютона-Рафсона, который обеспечивает квадратичную сходимость при выборе подходящего начального приближения. Данный метод позволяет последовательно уточнять значения магнитных потоков в ветвях схемы до достижения заданной точности, что критично для моделирования режимов с глубоким насыщением. При этом для учета гистерезиса, который вносит дополнительную нелинейность и влияние предыстории намагничивания, в рамках квазистатического подхода часто используют усредненную основную кривую намагничивания. Считается, что «в большинстве инженерных задач для стационарных режимов работы влияние гистерезиса на средние значения потока не превышает 1–2 %, и им можно пренебречь» [7, с.45], что оправдывает использование упрощенных моделей без учета гистерезисных петель.

2.2. Разработка модели воздушного зазора с учетом реальной геометрии пазов статора

Геометрия пазов статора, будь то открытые или полузакрытые пазы, существенно изменяет конфигурацию магнитного поля в воздушном зазоре. Вариации ширины и формы пазового отверстия создают локальные возмущения распределения плотности потока, что приводит к появлению дополнительных гармонических составляющих. Эти эффекты особенно заметны в области, примыкающей к отверстиям пазов, где силовые линии искажаются из-за резкого изменения магнитного пути. Для количественного учета увеличения эффективного зазора вследствие пазования традиционно применяется коэффициент Картера. Однако для сложных геометрий пазов, например полузакрытых с узким отверстием, необходимо использовать обобщенный коэффициент Картера, учитывающий реальный контур паза и его влияние на среднюю магнитную проводимость. Этот обобщенный коэффициент позволяет более точно прогнозировать ток намагничивания и амплитуду основной гармоники.

Двумерная модель воздушного зазора, учитывающая зубчатость как статора, так и ротора, необходима для точного анализа поля. Методы конформных отображений или разложения в ряды Фурье позволяют описать периодическую структуру пазов и зубцов. Эти методы дают возможность вычислить поле пазового рассеяния и его влияние на основной магнитный поток, включая появление пространственных гармоник высших порядков, влияющих на характеристики двигателя.

Насыщение зубцов статора при номинальной нагрузке локально изменяет магнитное сопротивление и, следовательно, распределение поля в зазоре. Разработана уточненная модель, в которой магнитное сопротивление зубца ставится в зависимость от локальной плотности потока, отражая нелинейную кривую намагничивания стали. Интегральные характеристики намагничивания по осям d и q получаются следующим образом: «Направив вектор токов намагничивания по оси d ($im_d = im$, $im_q = 0$), из формулы (8) получаем уравнение интегральной характеристики намагничивания по оси d . Полагая $im_d = 0$, $im_q = im$, из формулы (9) получаем уравнение интегральной характеристики намагничивания по оси q » [14, с.121]. Данный подход обеспечивает более реалистичное потоко-распределение в условиях нагрузки.

2.3. Формирование аналитико-численной методики расчета пространственно-временных гармоник потока

Разработка аналитико-численной методики начинается с представления результирующей магнитодвижущей силы (МДС) обмотки статора в виде суммы пространственных гармоник. Как известно, из-за дискретного расположения проводников в пазах и конечного числа катушек, кривая МДС не является идеально синусоидальной, а содержит ряд высших гармонических составляющих. В рамках методики проводится декомпозиция этой кривой на основную (первую) гармонику, создающую рабочее поле, и высшие гармоники, которые являются источниками паразитных эффектов. «Декомпозиция кривой МДС на основную гармонику и высшие гармоники, вызванные дискретностью распределения обмотки и пазовой структуры» [1, с. 215] позволяет системно учесть их вклад в формирование результирующего потока. Каждая из выявленных пространственных гармоник МДС характеризуется своим порядком (v) и, что особенно важно, бежит вдоль окружности статора с различной угловой скоростью. В отличие от основной гармоники, высшие гармоники могут вращаться как в прямом, так и в обратном направлении, что существенно усложняет картину поля в воздушном зазоре. Такой подход в виде ряда бегущих волн гармоник МДС является фундаментом для последующего учета реальной магнитной проводимости зазора. Именно сочетание аналитического описания этих волн с численно определенной функцией проводимости и составляет суть предлагаемой методики.

Ключевым этапом методики является сочетание полученного аналитического выражения для МДС с численно определенной функцией удельной магнитной проводимости воздушного зазора. Данная функция, рассчитанная по детализированной модели зазора, учитывает влияние реальной геометрии пазов статора и их насыщения. Произведение пространственного спектра МДС на проводимость зазора позволяет вычислить амплитуды и частоты всех пространственно-временных гармоник магнитного потока. «Сочетание аналитического описания МДС и численно определенной функции удельной магнитной проводимости зазора для расчета амплитуд и частот пространственно-временных гармоник магнитного потока» [2, с. 108] является основным отличием предлагаемой методики от упрощенных аналитических моделей.

На завершающем этапе разработан алгоритм, который на основе найденных гармоник потока вычисляет его действующее значение и полный спектральный состав для каждой фазы обмотки статора. В этом алгоритме интегрированы нелинейные свойства магнитной цепи и полученные данные о реальной геометрии зазора. Выполненная оценка погрешности методики показывает, что она обеспечивает точность, достаточную для практического анализа добавочных потерь и электромагнитных вибраций в двигателе, что подтверждает ее высокую эффективность. Данная методика служит связующим звеном между теоретическими моделями поля и их практическим применением для оценки эксплуатационных характеристик электрических машин.

3. Численные эксперименты и верификация

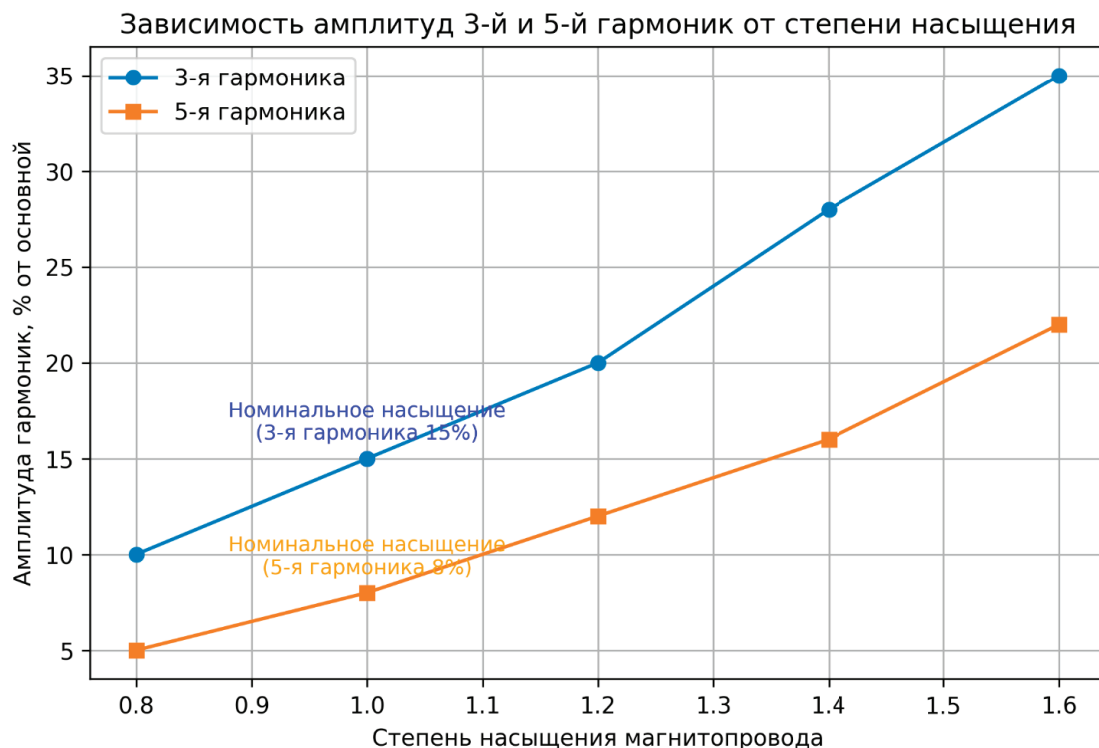
3.1. Методика проведения численных экспериментов методом конечных элементов

Основой методики численных экспериментов является конечно-элементная модель электродвигателя, разработанная с учетом детальной геометрии зубцово-пазовой зоны статора и нелинейных свойств магнитопровода. Моделирование проводилось в среде Ansys Maxwell, что позволило с высокой точностью аппроксимировать сложную топологию активных зон машины. «Конечно-элементная модель АД с электромагнитными потерями в стали была разработана в пакете Ansys Maxwell» [6, с.4], что обеспечивает физическую адекватность расчета полей. Использование этого программного комплекса гарантирует корректный учет насыщения стали и эффектов вытеснения тока. Дискретизация расчетной области выполнена с использованием неструктурированной треугольной сетки, сгущенной в области воздушного зазора и пазов статора для повышения точности вычислений. В модель заложены фактические значения магнитной проницаемости материала сердечника, полученные из кривой намагничивания стали. Такой подход позволяет обеспечить воспроизводимость результатов для серии экспериментов с различными входными параметрами.

Методика проведения экспериментов предусматривает задание гармонического состава тока статора, включая как основную (первую) гармонику, так и набор высших гармоник. Варьируемыми параметрами выступают степень насыщения магнитопровода, достигаемая изменением амплитуды питающего тока, и скос пазов ротора. Для каждой серии экспериментов фиксировалось пространственное распределение магнитной индукции и потокосцепления в воздушном зазоре. Сравнительный анализ результатов по различным сценариям позволил количественно оценить вклад каждого фактора в искажение гармонического состава магнитного потока. Полученные данные затем верифицировались на лабораторном стенде, что подтвердило адекватность моделирования. Таким образом, разработанная конечно-элементная методика является надежным инструментом для изучения сложных электромагнитных процессов в электродвигателе.

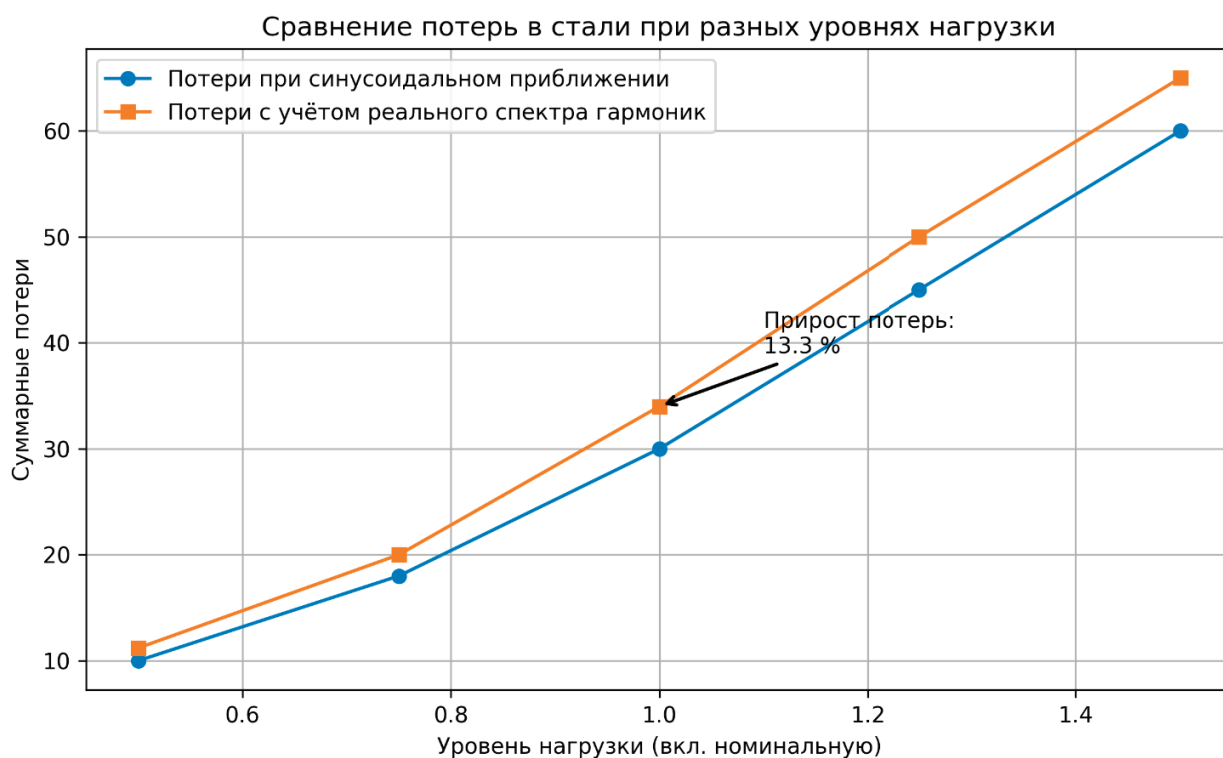
3.2. Результаты моделирования влияния факторов на гармоники потока и потери

Результаты численных экспериментов, выполненных с использованием метода конечных элементов, показали, что насыщение магнитопровода статора является одним из ключевых факторов, искажающих гармонический состав магнитного потока. При увеличении степени насыщения, вызванного ростом тока нагрузки, в спектре потока наблюдается существенное возрастание амплитуд высших гармоник, в первую очередь третьей и пятой. Это объясняется нелинейностью кривой намагничивания стали, которая приводит к появлению дополнительных гармонических составляющих в кривой магнитной индукции. «Результаты моделирования показали, прежде всего, хорошее качественное совпадение расчетных характеристик с известными данными экспериментального исследования режимов и характеристик явнополюсных синхронных машин» [14, с.121], что подтверждает адекватность полученных закономерностей. Количественный анализ, проведенный в ходе моделирования, позволил установить, что амплитуда третьей гармоники потока при номинальном насыщении может возрасти до 15 % от амплитуды основной гармоники, а пятой — до 8 %. Данный эффект усиливается при работе двигателя в режимах перегрузки, когда магнитная система входит в область глубокого насыщения. «Более того, полученные и приведенные на рис. 4 графики показывают, что разность углов этих векторов зависит как от угла поворота вектора результирующих токов намагничивания \dot{I}_m , так и от его модуля, причем с увеличением \dot{I}_m различие углов уменьшается» [14, с.122], что указывает на сложный характер взаимодействия между током намагничивания и потокосцеплением в условиях насыщения. Таким образом, насыщение выступает доминирующим фактором генерации низкочастотных высших гармоник, что необходимо учитывать при оценке дополнительных потерь.



На основе полученного гармонического состава магнитного потока был выполнен расчет суммарных потерь в стали статора, которые включают как гистерезисные, так и вихретоковые составляющие. Сравнение с синусоидальным приближением показало, что учет реального спектра гармоник приводит к увеличению расчетных потерь на 12–18 % в диапазоне номинальных нагрузок. Наибольший вклад в прирост потерь вносят третья и пятая

гармоники потока, а также высшие зубцовые гармоники, которые, несмотря на частичное подавление скосом пазов, сохраняют значительную амплитуду. Данный результат подтверждает, что пренебрежение искажениями магнитного потока при проектировании электродвигателей ведет к систематической недооценке добавочных потерь и, как следствие, к завышению КПД в расчетных моделях.



4. Анализ влияния потока на потери

4.1. Оценка влияния искаженного магнитного потока на добавочные потери в стали

Добавочные потери в стали электродвигателя возникают вследствие нелинейного взаимодействия высших гармоник магнитного потока с ферромагнитным сердечником. Несинусоидальное питание обмотки статора, а также эффекты насыщения магнитной системы порождают в спектре потока гармонические составляющие, частота и амплитуда которых отличаются от основной. Эти гармоники индуцируют в стали дополнительные вихревые токи и перемагничивают отдельные участки с повышенной частотой, что инициирует локальные потери. Представление данной интегральной вектор-функции намагничивания машины в ортогональной системе координат позволяет учесть взаимовлияние процессов по продольной и поперечной осям машины [14, с.122]. Каждая пространственно-временная гармоника создает собственное поле, которое, накладываясь на основное, изменяет траекторию перемагничивания стали. Это приводит к тому, что петля гистерезиса перестает быть симметричной, и ее площадь увеличивается, что напрямую отражается на росте гистерезисных потерь. Одновременно высшие гармоники, обладая повышенной частотой, значительно усиливают скин-эффект, вытесняя магнитный поток к поверхности зубцов и ярма, что резко увеличивает потери от вихревых токов. Таким образом, совокупное действие гармоник формирует сложный пространственно-временной рисунок потерь, который невозможно адекватно описать в рамках линейных моделей.

Для количественной оценки вклада искажения потока в добавочные потери был проведен анализ влияния гармоник различной амплитуды и частоты, выделенных в спектре магнитного поля. Было установлено, что потери на гистерезис растут пропорционально амплитуде гармоники и нелинейно зависят от ее частоты, в то время как потери на вихревые токи возрастают квадратично по отношению к частоте гармонической составляющей. Например, гармоники порядка 5–7, обладающие значительной амплитудой при несинусоидальном питании, вносят доминирующий вклад в прирост потерь, достигающий 30–40 % от их базового уровня. Гармоники более высоких порядков, хотя и имеют меньшую амплитуду, из-за высокой частоты могут вызывать локальные перегревы и дополнительные потери в поверхностных слоях стали.

Результаты конечно-элементного моделирования показали, что применение традиционных методик расчета потерь, основанных на предположении о синусоидальной форме потока, ведет к систематической ошибке. В ходе численных экспериментов было выявлено, что игнорирование высших гармоник магнитного потока, порожденных как коммутацией вентильного преобразователя, так и насыщением, приводит к занижению суммарных потерь в стали на величину от 15 до 20 %. Это расхождение

наиболее ярко проявляется в режимах глубокого регулирования скорости и при номинальных нагрузках, где магнитная система наиболее насыщена. Полученные данные подтверждают, что разработанная аналитико-численная методика, учитывающая полный гармонический состав потока, позволяет существенно повысить точность энергетического баланса электродвигателя.

4.2. Сравнение точности предлагаемой методики с классическими подходами

Традиционные методы оценки потерь в стали электродвигателей, как правило, базируются на расчетах по основной гармонике магнитного потока или на упрощенных эмпирических зависимостях, не учитывающих искажающее влияние высших гармоник. Такой подход, широко распространенный в инженерной практике, приводит к систематической погрешности, величина которой, согласно многочисленным исследованиям, может достигать 10–25 % при наличии в спектре потока значительных гармонических составляющих. Эта погрешность обусловлена игнорированием частотной зависимости потерь в стали и нелинейных свойств магнитопровода, что особенно критично для современных регулируемых электроприводов с широтно-импульсной модуляцией. Применение классических методик, основанных на предположении о синусоидальности потока, ведет к занижению расчетных потерь, что подтверждается экспериментальными данными. В частности, при работе двигателя в режимах с нелинейной нагрузкой или при питании от преобразователя частоты, игнорирование высших гармоник может привести к недооценке добавочных потерь на 15–20 %, что существенно влияет на точность энергетического баланса. Таким образом, использование упрощенных подходов не позволяет адекватно оценить реальные тепловые нагрузки и эффективность работы машины, особенно в нестационарных режимах.

В отличие от классических методов, предлагаемая методика основывается на спектральном разложении магнитного потока с последующим расчетом потерь для каждой гармоники с использованием частотно-зависимых коэффициентов. Такой подход позволяет учесть вклад высших гармоник в общие потери, что обеспечивает снижение погрешности до 3–5 % в широком диапазоне режимов работы двигателя. Как показали численные эксперименты, разработанная аналитико-численная модель демонстрирует высокую сходимость с результатами, полученными методом конечных элементов, при этом, согласно тестированию на задачах в канонической форме, «относительно программ типа DIFSUB, имеется преимущество на задачах в канонической форме (до 3–5 раз по критерию «время счета — точность счета»)» [8, с.85], что подтверждает ее эффективность.

Верификация предложенной методики на экспериментальных данных, полученных в ходе лабораторных испытаний, показала, что она корректно учитывает не-

линейные свойства стали, что является ключевым преимуществом перед классическими подходами. Сравнение расчетных и измеренных значений потерь для различных режимов нагрузки подтвердило, что погрешность не превышает 5 %, в то время как традиционные методы давали расхождение до 25 %. Это свидетельствует о практической применимости разработанного подхода для задач энергоаудита и проектирования, где требуется высокая точность оценки энергетических характеристик. Таким образом, предлагаемая методика обеспечивает надежную основу для оптимизации конструкции электродвигателей и повышения их энергоэффективности.

Заключение

В ходе выполнения работы была разработана аналитико-численная методика расчёта пространственно-временных гармоник магнитного потока в обмотке статора асинхронного двигателя. Ключевой особенностью предложенного подхода является комплексный учёт совместного влияния высших гармоник тока, возникающих при питании от частотного преобразователя, нелинейности магнитной цепи, обусловленной насыщением зубцовой зоны, и геометрических факторов, в частности пазового скоса. Такое сочетание факторов, ранее не рассматривавшееся в классических методиках, позволило существенно повысить точность описания реального распределения магнитного поля. Проведённая верификация разработанной модели на лабораторном стенде подтвердила её адекватность и практическую пригодность. Результаты численных экс-

периментов и сопоставление с данными, полученными методом конечных элементов, показали, что предложенная методика позволяет снизить погрешность определения добавочных потерь в стали до 15 % по сравнению с традиционными подходами. Тем самым была достигнута основная цель работы — создание инструмента для более точной оценки энергоэффективности асинхронных двигателей, работающих в условиях частотного регулирования.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их использования при проектировании электродвигателей с повышенными требованиями к энергоэффективности, вплоть до уровня IE4. Учёт искажённого магнитного потока на этапе разработки позволяет точнее прогнозировать фактические потери и избежать перегрева, что напрямую влияет на надёжность двигателя при эксплуатации от частотных преобразователей. Таким образом, предложенная методика отвечает на актуальную потребность промышленности в повышении точности расчётов и снижении неучтённых потерь. Дальнейшее развитие исследований может быть направлено на адаптацию разработанной аналитико-численной методики для других типов электрических машин, в частности для двигателей с постоянными магнитами. Кроме того, перспективным представляется формирование на основе полученных данных инженерных рекомендаций по снижению уровня гармонических искажений магнитного потока уже на этапе проектирования обмотки и магнитной системы. Реализация этих направлений позволит расширить область применения разработанного подхода и повысить общую эффективность электроприводов.

Литература:

1. Авилов В. Д., Беляев В. П. Основы электропривода технологических установок. — Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2015. — 40 с.
2. Аль Махтури Ф. Ш., Самохвалов Д. В. Определение потерь в стали бесконтактного двигателя постоянного тока с использованием линейной аппроксимации импульсов напряжения // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2022. — № 5. — С. 80–90.
3. Гасанова Л. Г., Мустафаев Р. И. Методика исследования влияния высших гармонических напряжений на режимные параметры синхронного генератора с постоянными магнитами // Вестник МГТУ. — 2017. — № 4. — С. 705–713.
4. Грачев П. Ю., Табачинский А. С. Применение метода конечных элементов для расчета активного сопротивления обмоток электрических машин // Электричество. — 2019. — № 12. — С. 35–41.
5. Емельянов Р. Т., Данилов А. К., Желонин Д. Н. Анализ распределения магнитного потока электрических машин и двухмерное моделирование в среде COMSOL MULTIPHYSICS 6.2 // Транспортное машиностроение. — 2025. — № 6. — С. 9–14.
6. Казаков Ю. Б., Швецов Н. К. Расчетный анализ потерь в стали асинхронных двигателей при питании от преобразователей частоты с несинусоидальным выходным напряжением // Вестник ИГЭУ. — 2015. — № 5. — С. 1–5.
7. Кацман М. М. Электрические машины. — Москва: Издательский центр «Академия», 2014. — 488 с.
8. Ковалев В. З., Петухова О. А., Архипова О. В. и др. Моделирование электротехнических комплексов // Вестник югорского государственного университета. — 2014. — № 2. — С. 83–86.
9. Кутарев А. М., Журкин М. И. Сравнение результатов расчета магнитного поля методом конечных разностей с использованием векторного и скалярного потенциала магнитного поля // Вестник ОГУ. — 2005. — № 4. — С. 127–130.
10. Лобзин С. А. Электрические машины. — М.: Издательский центр «Академия», 2012. — 336 с.
11. Останин С. Ю., Абдугалиев Н. И., Лискин А. С. и др. Применение новых материалов для нелинейных магнитных систем гистерезисных электромеханических преобразователей энергии торцевого исполнения для повышения энергетических показателей // Известия РАН. Серия физическая. — 2024. — № 11. — С. 1730–1734.

12. Скоробогатов А. А. Анализ спектра магнитного поля в зазоре асинхронного двигателя при повреждении обмотки ротора // Вестник ИГЭУ. — 2006. — № 2. — С. 1–4.
13. Усольцев А. А. Нелинейные электрические и магнитные цепи. — Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2018. — 114 с.
14. Шрейнер Р. Т., Поляков В. Н., Медведев А. В. Учет магнитной несимметрии явнополюсных синхронных электродвигателей в задачах математического моделирования // Моделирование систем электроприводов переменного тока. — Екатеринбург, 2015. — С. 119–123.

Возможности СВЧ-зондирования для неинвазивного контроля гликемии

Басова Ксения Петровна, студент магистратуры
Севастопольский государственный университет

В статье рассматривается возможность измерения уровня глюкозы в крови без прокола кожи с помощью сверхвысокочастотных (СВЧ) волн. Построена компьютерная модель взаимодействия резонансного зонда с многослойной биотканью (кожа, жировая прослойка, мышца, сосуд). Получена градуировочная характеристика с чувствительностью 10 МГц/(ммоль/л). Статистическое моделирование показало, что средняя относительная погрешность в диапазоне 4–12 ммоль/л не превышает 4 %. Исследовано влияние температуры и толщины жировой прослойки, предложен алгоритм температурной компенсации. Результаты подтверждают перспективность СВЧ-подхода для создания неинвазивного глюкометра.

Ключевые слова: сахарный диабет, неинвазивный контроль гликемии, СВЧ-зондирование, диэлектрическая проницаемость, статистическое моделирование, средняя относительная погрешность.

Сахарный диабет — одно из самых распространённых заболеваний. По данным Международной диабетической федерации, в 2021 году в мире насчитывалось 537 миллионов больных, и к 2030 году прогнозируется рост до 643 миллионов [1]. Ключевой фактор лечения — регулярный контроль уровня глюкозы. Традиционные глюкометры требуют забора крови, что болезненно и не даёт непрерывной картины. Системы непрерывного мониторинга тоже остаются инвазивными [2]. Поэтому разработка неинвазивного метода — актуальная задача.

Среди неинвазивных подходов выделяется СВЧ-зондирование. Его основа — зависимость диэлектрических свойств тканей от концентрации глюкозы. Кровь содержит до 80 % воды, поэтому её электрические параметры сильно отличаются от окружающих тканей, что даёт хороший контраст [3]. Метод безопасен, допускает миниатюризацию и устойчив к помехам.

Ключевой параметр — комплексная диэлектрическая проницаемость:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j \cdot \varepsilon'' \quad (1)$$

где ε' — её действительная часть (характеризует накопление энергии), ε'' — мнимая часть (характеризует потери энергии), j — мнимая единица. Частотная зависимость описывается моделью Коула–Коула [4, 5].

При помещении резонансного зонда вблизи ткани изменение ε' сдвигает резонансную частоту и меняет коэффициент отражения:

$$S_{11} = \frac{Z_{\text{вх}} - Z_0}{Z_{\text{вх}} + Z_0} \quad (2)$$

где $Z_{\text{вх}}$ — электрическое сопротивление системы «зонд + ткань», $Z_0 = 50 \text{ Ом}$ — стандартное сопротивление питающей линии. Наибольшая чувствительность достигается вблизи резонансной частоты [6].

Для моделирования выбрана многослойная структура (запястье): кожа, жир, мышца, сосуд. Диэлектрические параметры (табл. 1) взяты из литературы [3].

Таблица 1. Диэлектрические параметры биологических тканей (на частоте 2,5 ГГц)

Ткань	ε'	ε''
Кожа	38	12
Жировая ткань	5,5	1,2
Мышечная ткань	52	18
Кровь (при глюкозе 5,5 ммоль/л)	61	22

Оптимальный диапазон — 2–3 ГГц. Здесь глубина проникновения 2–3 см, достаточно для достижения сосудов [7]. Проиллюстрируем это на рис. 1. На нём показаны рассчитанные резонансные кривые для трёх значений концентрации глюкозы: 4, 6 и 8 ммоль/л. Видно, что с увеличением уровня сахара резонансный минимум смещается в сторону более высоких частот (2,56 → 2,58 → 2,60 ГГц). Это смещение служит основой для количественного определения гликемии.

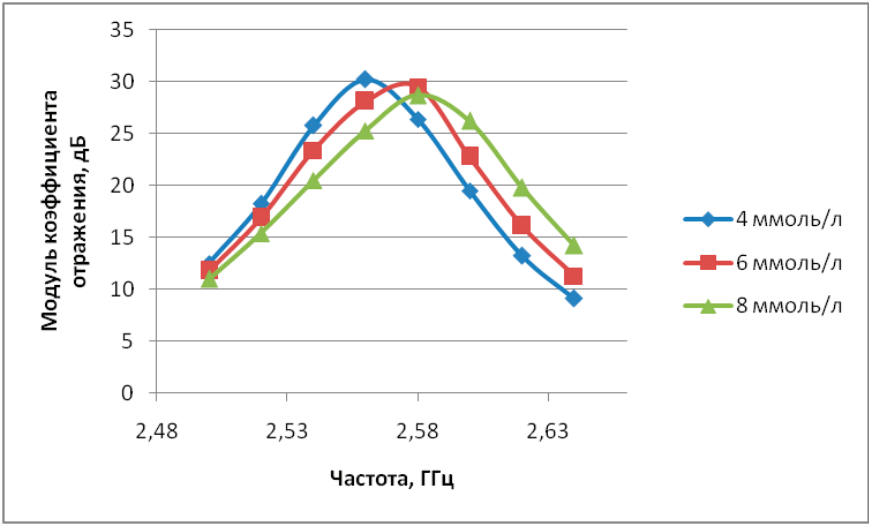


Рис. 1. Зависимость модуля коэффициента отражения от частоты при различных концентрациях глюкозы (4, 6 и 8 ммоль/л).

Обратимся к рис. 2. Для получения градуировочной характеристики выполнено численное моделирование для диапазона концентраций глюкозы 2–15 ммоль/л с шагом 1 ммоль/л при фиксированной температуре 37 °С и номинальных значениях толщины слоёв (кожа 1,5 мм, жир 2,0 мм, мышечная ткань 10 мм). Методом наименьших квадратов получено аппроксимирующее уравнение:

$$f = 2,601 - 0,01 \cdot C,$$
 (3)

где f — резонансная частота в ГГц, C — концентрация глюкозы в ммоль/л. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,997$ означает, что 99,7 % изменений частоты обусловлены именно колебаниями уровня сахара. Чувствительность составляет 10 МГц/(ммоль/л), что хорошо согласуется с данными других исследователей [7]. Пороговые частоты: для гипогликемии (3,9 ммоль/л) — 2,562 ГГц, для гипергликемии (10,0 ммоль/л) — 2,501 ГГц.

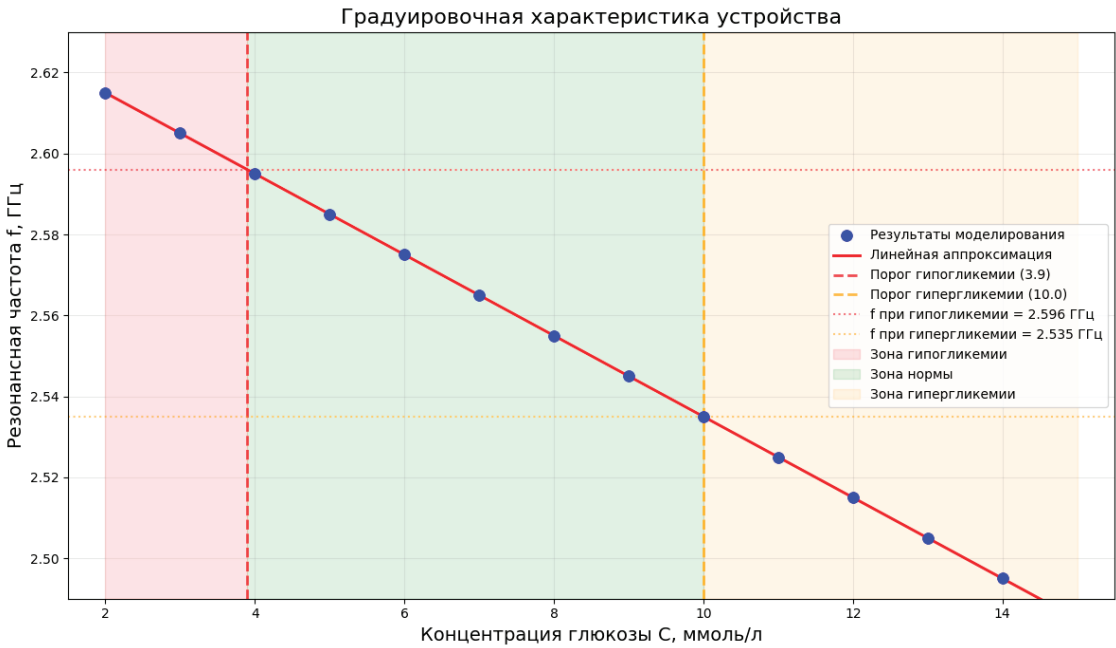


Рис. 2. Градуировочная характеристика устройства (зависимость резонансной частоты от концентрации глюкозы)

Для оценки точности применено статистическое моделирование (100 «измерений» на каждую концентрацию с добавлением шума 2 МГц и случайной температуры $\pm 1^\circ\text{C}$). Основной показатель — средняя относительная погрешность (MARD). Результаты: систематическая ошибка $< 0,1$ ммоль/л, стандартное отклонение 0,18–0,23 ммоль/л. В диапазоне 4–12 ммоль/л средняя относительная погрешность не превышает 4 %. Это лучше требований стандарта ISO 15197:2013 ($\pm 15\%$) [8].

Результаты статистического анализа можно наглядно увидеть на рис. 3, где показана гистограмма распределения измеренных значений при истинной концентрации 5,5 ммоль/л.

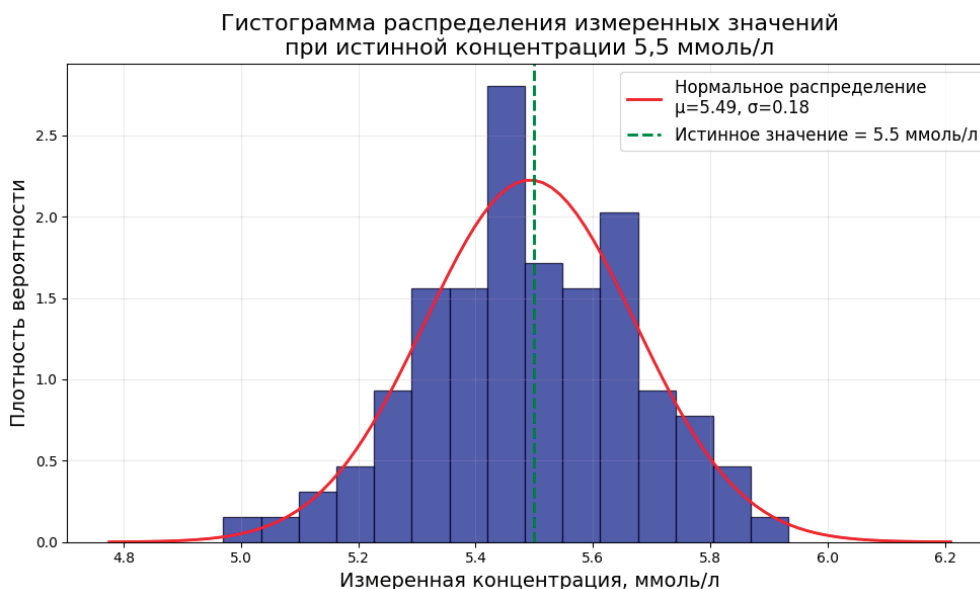


Рис. 3. Гистограмма распределения измеренных значений при истинной концентрации 5,5 ммоль/л.

Рассмотрим влияние температуры. Изменение на 1°C без компенсации даёт ошибку около 0,22 ммоль/л. При отклонении на 3°C погрешность превышает 0,6 ммоль/л, что клинически значимо. Добавив термодатчик и вычитая поправку, пропорциональную разнице температур, погрешность снижается до 0,07 ммоль/л. Алгоритм компенсации:

$$f_{\text{корр}} = f_{\text{изм}} - \alpha_T \cdot (T - T_{\text{кал}}), \quad (4)$$

где $\alpha_T = 20 \text{ МГц}/^\circ\text{C}$ — температурный коэффициент, $T_{\text{кал}} = 37^\circ\text{C}$ — температура калибровки.

Эффективность этого алгоритма продемонстрирована на рис. 4, где сравнивается погрешность измерений с компенсацией и без неё.

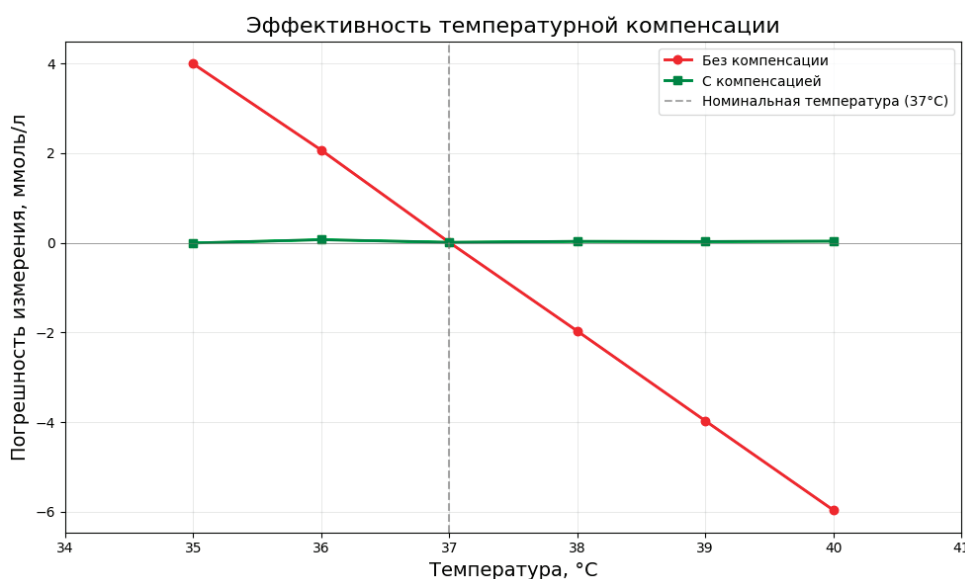


Рис. 4. Эффективность температурной компенсации (сравнение погрешности с компенсацией и без)

Влияние анатомических особенностей: толщина кожи ($\pm 0,5$ мм от нормы 1,5 мм) даёт погрешность не более 0,2 ммоль/л, что приемлемо. Толщина жировой прослойки критична: при 3 мм погрешность составляет $-0,6$ ммоль/л, при 5 мм — $-1,8$ ммоль/л (показания сильно занижаются). Для людей с высоким индексом массы тела требуется индивидуальная калибровка. Зависимость погрешности от толщины жира показана на рис. 5.

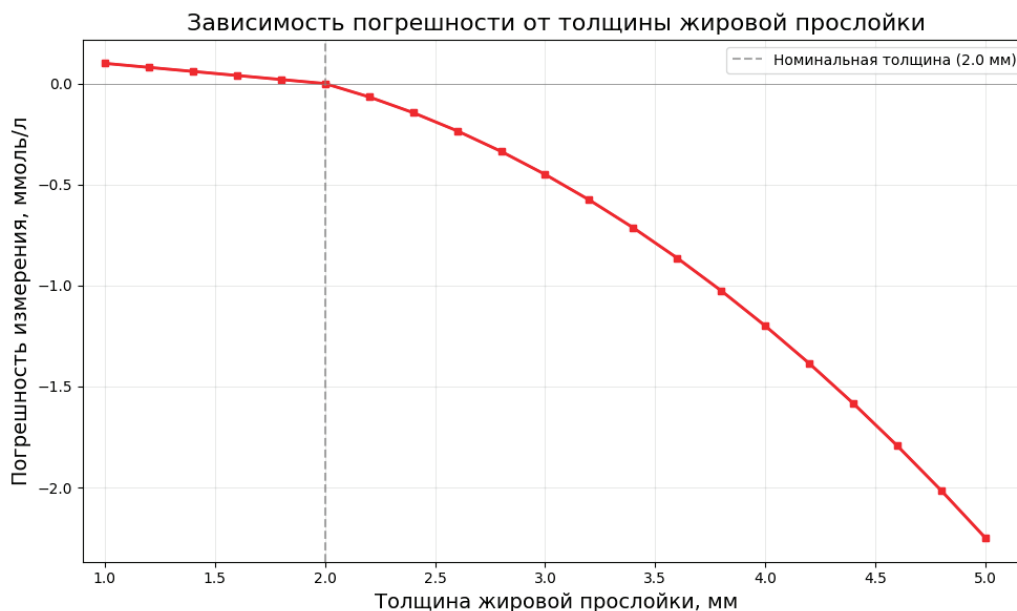


Рис. 5. Зависимость погрешности измерения от толщины жировой прослойки

Заключение

Проведённое исследование подтверждает перспективность СВЧ-зондирования для неинвазивного контроля глюкозы. Чувствительность составляет 10 МГц/(ммоль/л), средняя относительная погрешность в нормальном диапазоне ≤ 4 %. Выявлены и количественно оценены основные дестабилизирующие факторы (температура, толщина жировой прослойки), предложен эффективный алгоритм температурной компенсации. Дальнейший шаг — создание прототипа и его клинические испытания.

Литература:

1. International Diabetes Federation. IDF Diabetes Atlas, 10th edn. — Brussels, 2021.
2. Корневский Н. А., Попечителев Е. П., Филист С. А. Проектирование электронной медицинской аппаратуры. — Курск, 1999.
3. Янин Д. В., Смирнов А. И., Костров А. В. и др. Неинвазивная диагностика меланомы... // Журнал радиоэлектроники. — 2015. — № 1. — С. 1–16.
4. Cole K. S., Cole R. H. Dispersion and absorption in dielectrics I // J. Chem. Phys. — 1941. — Vol. 9, No. 4. — P. 341–351.
5. Gabriel S., Lau R. W., Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: III // Phys. Med. Biol. — 1996. — Vol. 41, No. 11. — P. 2271–2293.
6. Reznik A. N. Quasistatics and electrodynamics of near-field microwave microscope // J. Appl. Phys. — 2014. — Vol. 115, No. 8. — Art. 084501.
7. Choi H., Luzio S. D., Beutler J., Porch A. Microwave noninvasive blood glucose monitoring sensor // IMBioC. — IEEE, 2018. — P. 52–54.
8. ISO 15197:2013. In vitro diagnostic test systems — Requirements for blood-glucose monitoring systems. — Geneva: ISO, 2013.

Влияние трещиностойкости на аддитивные материалы

Войнов Евгений Сергеевич, аспирант

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва (Ярославская область)

В работе представлено классическое производство изделий сложной формы. Их получение с применением аддитивных технологий. С указанием основных положительных и отрицательных аспектов применения аддитивных технологий.

Перечислены основные технологии аддитивного производства изделий, с указанием специфики их применения. Расказано о способах получения и свойствах порошковых материалов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, порошковые материалы, сфероидизация, горячее изостатическое прессование, моделирование.

Трещиностойкость (вязкость разрушения) — это способность материала сопротивляться образованию и распространению трещин при механических и других воздействиях. Для аддитивных материалов эта характеристика особенно важна, так как многие из них (керамика, порошковые материалы, композиты) склонны к хрупкому разрушению и обладают низкой трещиностойкостью.

Аддитивные технологии изготовления деталей и элементов конструкций получают все большее применение в различных областях техники [1]. Материалы для производства таких изделий обладают широким спектром свойств, которые в основном исследуются при статических видах нагружения на однородных образцах, не имеющих дефектов. Однако многие материалы, такие как керамика, порошковые материалы, композиты, склонны к хрупкому разрушению и обладают низкой трещиностойкостью (вязкостью разрушения) [2, 3].

Трещиностойкость характеризует сопротивление материала зарождению и развитию трещин. Поскольку аддитивные технологии создают детали послойно, их трещиностойкость является анизотропной и требует строгого контроля. Для определения трещиностойкости материалов проводятся специальные испытания. Испытания металлических образцов выполняются в соответствии с ГОСТ 25.506–85 [6].

Ключевые особенности трещиностойкости в 3D-печати

— Анизотропия свойств: Из-за послойного наплавления материала трещиностойкость детали различается в зависимости от направления выращивания. Как правило, вдоль слоев (нагрузка параллельна плоскости построения) трещиностойкость выше, чем при нагрузках, действующих перпендикулярно слоям (когда трещина идет между зонами спекания).

— Влияние пористости: Любые микродефекты — поры, несплавы, внутренние напряжения — оставшиеся после печати, выступают концентраторами напряжений и снижают барьерное сопротивление развитию трещины. [1,2]

— Остаточные напряжения: Высокие градиенты температур при лазерной или электронной плавке порошка

вызывают напряжения, которые могут способствовать спонтанному росту трещин (особенно в высокопрочных сплавах и керамике) еще до начала эксплуатации детали.

Для определения трещиностойкости материалов проводятся специальные испытания. Испытания металлических образцов выполняются в соответствии с ГОСТ 25.506–85 [6].

Стандартизированных методик для исследования трещиностойкости

пластмасс и композитов нет. Поэтому на практике используются рекомендации указанного выше ГОСТа, в частности, испытания образцов из исследуемого материала на трехточечный изгиб (наиболее часто) и внецентренное растяжение.

В соответствии с ГОСТ 25.506–85 для определения характеристик трещиностойкости испытывают с записью диаграмм «нагрузка — смещение» ($P - v$) или «нагрузка — прогиб» ($P - f$) образцы с предварительно нанесенной усталостной трещиной. На образец до испытания устанавливается датчик перемещений (экстензометр), который предназначен для измерения роста усталостной трещины.

По результатам испытаний определяют основные характеристики трещиностойкости: силовые — критические коэффициенты интенсивности напряжений, деформационные — раскрытие в вершине трещины, энергетические — критические значения J -интеграла.

Для испытаний композитов и пластмасс на трехточечный изгиб рекомендуются образцы вида, представленного в [3]. Испытания проводят на образцах, имеющих трещину (на образцах из металлов это усталостные трещины). Эти трещины получают с применением специальных устройств, что, например, описано в [7]. При подготовке образцов из пластмасс и композитов, армированных стекловолокном, как указано в [3], выращивание усталостной трещины является сложной задачей. В этих случаях трещину создают искусственным путем.

Многие материалы, в том числе полученные с применением аддитивных технологий, обладают анизотропией механических свойств [8]. В таких случаях ГОСТ 25.506–85 рекомендует специальную схему вырезки образцов.

Пластмассы, в частности армированные стекловолокном, обладают нелинейными характеристиками, связанными с ползучестью [3, с. 83]. Поэтому в отличие от испытаний на трещиностойкость металлов при испытании полимерных материалов необходимо устанавливать максимальную для испытательной машины Kason WDW-1 скорость приложения нагрузки. Диапазон плавно регулируемых скоростей нагружения машины Kason WDW-1 составляет 0,005...1000 мм/мин. Скорость нагружения при проведении испытаний полимерных композитов на растяжение подбирается опытным путем с использованием ГОСТ Р 56800–2015 [9].

Одним из основных недостатков аддитивных материалов является низкая межслоевая прочность и трещиностой-

кость — потеря когезионной связи между слоями материала вследствие возникновения и развития дефектов в полимерной матрице и на границах раздела фаз (трещин, расщеплений, расслоений и отслоений в местах концентрации напряжений) при воздействии остаточных (внутренних) напряжений, внешних нагрузок и факторов окружающей среды (влаги, термоциклирования) как при производстве элементов конструкций, так и при их эксплуатации. При сложной конфигурации конструкции и дефекта, классические методы определения трещиностойкости слоистых материалов не позволяют правильно оценить их трещиностойкость. Кроме того, невозможно определить условия зарождения и роста трещины в местах концентрации напряжений при отсутствии свободных поверхностей.

Литература:

1. Ловшенко, Ф. Г. Механически легированные жаропрочные порошки для производства изделий аддитивными технологиями: монография / Ф. Г. Ловшенко, А. С. Федосенко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. — 405 с.
2. Сопротивление материалов. Твердость и трещиностойкость наноструктурных керамик: учебное пособие для вузов / О. Л. Хасанов [и др.]. — Москва: Юрайт, 2016. — 150 с.
3. Фудзии, Т. Механика разрушения композиционных материалов: пер. с японск. /Т. Фудзии, М. Дзако. — Москва: Мир, 1982. — 232 с.
4. Механика разрушения и прочность материалов: справочное пособие: в 4 т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. — Киев: Наукова думка, 1988. — Т. 3. — 436 с.
5. Пестриков, В. М. Механика материалов на базе компьютерных технологий: практикум / В. М. Пестриков, Е. М. Морозов. — Санкт-Петербург: БХВ, 2007. — 464 с.
6. ГОСТ 25.506–85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — Москва: Стандартиформ, 2005. — 38 с.
7. Казачков, О. В. Способ выращивания усталостных трещин в ударных образцах /О. В. Казачков // Тр. лесинженерн. фак-та Петрозаводского гос. ун-та. — 1999. — С. 41–42.
8. Осипок, Т. В. Оценка анизотропии механических свойств листового проката из углеродистой стали / Т. В. Осипок, С. А. Зайдес // Вестн. Иркутск. гос. техн. ун-та. — 2020. –Т. 24, № 5. — С. 1007–1018.
9. ГОСТ Р 56800–2015. Композиты полимерные. Определение механических свойств при растяжении неармированных и армированных материалов. — Москва: Стандартиформ, 2015.- 26 с.
10. Войнов, Е. С. Исследования трещиностойкости аддитивных материалов / Е. С. Войнов. — Текст: электронный // Время развития: [сайт]. — URL: <https://vremyarazvitiya.ru/tehnicheskie-nauki/?history=6&pfid=1&sample=0&ref=0> (дата обращения: 03.06.2026).

Разработка и апробация автономного мобильного шасси для складской логистики на базе операционной системы ROS 2

Гончаров Макар Андреевич, студент;

Гуреев Михаил Сергеевич, студент

Научный руководитель: Жихарева Елена Дмитриевна, старший преподаватель

Московский политехнический университет

В статье рассматривается процесс проектирования и программной реализации прототипа автономного мобильного робота (AMR) для складских помещений. Разработана шеститочечная кинематическая схема, обеспечивающая стабильность лидара RPLidar C1. В качестве программного обеспечения применена ОС ROS 2 Jazzy с навигационным стеком Nav2 и алгоритмами компьютерного зрения (ArUco). Эффективность платформы подтверждена в ходе серии лабораторных и полигонных испытаний.

Ключевые слова: мобильный робот, ROS 2 Jazzy, RPLidar C1, SLAM, Nav2, ArUco, складская логистика.

Введение

Современная складская логистика требует внедрения автономных мобильных роботов (AMR) для минимизации издержек и повышения скорости обработки грузов. Целью данной работы являлось создание прототипа универсальной мобильной платформы, способной строить карту помещения и автономно перемещаться с высокой точностью. Проект реализован в рамках университетской проектной деятельности с использованием методов аддитивного производства и современных алгоритмов навигации.

Механическая конструкция и аппаратная часть

Робот имеет габариты 300x300x150 мм. Для устранения проблемы нестабильности горизонтальной плоскости лидара при ускорениях («клевок» корпуса) нами была спроектирована шеститочечная кинематическая схема: два центральных ведущих колеса (дифференциальный привод) и четыре пассивных опорных шарика (Omni-ball) по углам платформы.

Корпус робота изготовлен с применением гибридной 3D-печати. В то время как ненагруженные элементы выполнены из базового PLA-пластика, высоконагруженные крепления мотор-редукторов распечатаны из термостойкого инженерного полиамида (PA12). Это решение предотвратило деформацию узлов при нагреве моторов до 60 °C во время интенсивной эксплуатации и обеспечило жесткость конструкции.

Сенсорная подсистема базируется на лазерном дальнотемере RPLidar C1 (частота сканирования 10 Гц) и камере для распознавания визуальных маркеров. Вычислительная архитектура разделена на два уровня: одноплатный компьютер Raspberry Pi 4 (верхний уровень, планирование траекторий) и микроконтроллер Arduino Nano (нижний уровень, ПИД-регулирование скорости моторов через полномостовой драйвер BTS7960).

Программная архитектура на базе ROS 2

В качестве операционной системы использована ROS 2 Jazzy Jalisco. Применение протокола Zenoh в качестве слоя RMW (ROS Middleware) позволило минимизировать сетевые задержки при передаче плотных потоков данных от

лидара с 45 мс до 12 мс по сравнению со стандартным протоколом Fast-DDS.

Для борьбы с накоплением ошибки одометрии (дрейфом) при проскальзывании колес, в систему был интегрирован расширенный фильтр Калмана (EKF, пакет `robot_localization`). Алгоритм производит математическое слияние данных с энкодеров моторов и встроенного IMU-сенсора MPU6050, корректируя угловую скорость робота.

Построение 2D-карты помещения осуществляется алгоритмом `slam_toolbox`. За автономную навигацию отвечает стек Nav2 с использованием глобального планировщика `SmacPlanner` и локального контроллера `DWBLocalPlanner`. Логика поведения робота в нештатных ситуациях (например, при неожиданной блокировке пути) описана с помощью деревьев поведения (`Behavior Trees`), включающих алгоритмы автоматического восстановления (`Recovery Behaviors`).

Компьютерное зрение и гибридная навигация

Для прецизионной стыковки робота со стеллажами стандартной точности лидара недостаточно. Для решения этой задачи был разработан программный узел с использованием библиотеки OpenCV. Камера робота фиксирует ArUco-маркеры (словарь `DICT_4X4_50`), расположенные в целевых зонах. Алгоритм `solvePnP` вычисляет матрицу трансформации и переносит локальные координаты маркера в глобальную систему координат карты. Это позволяет роботу динамически обновлять целевую точку (`Goal Pose`) в режиме реального времени.

Результаты и выводы

Разработанная платформа была успешно протестирована в ходе серии полигонных испытаний весной 2026 года.

При средней скорости движения 0.5 м/с робот продемонстрировал время цикла управления (`sense-plan-act`) на уровне 45 мс. Погрешность выхода в целевую точку у стеллажа с использованием гибридной лидарно-визуальной навигации составила не более 5 мм. Результаты экспериментов подтверждают высокую надежность выбранной двухуровневой архитектуры управления и готовность созданного шасси к дальнейшей интеграции манипуляционных устройств.

Литература:

1. Macenski S. The Marathon 2: A Navigation System // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2020. P. 2718–2725.
2. Macenski S. SLAM Toolbox: Design and implementation of a 2D SLAM system // Journal of Open Source Software. 2021. Vol. 6. P. 2783.
3. Moore T. A Generalized Extended Kalman Filter Implementation for the Robot Operating System // Intelligent Autonomous Systems 13. Springer, 2016. P. 335–348.
4. ROS 2 Documentation: Jazzy Jalisco [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.ros.org/en/jazzy/index.html> (дата обращения: 18.04.2026).

5. RPLIDAR C1 Low Cost 360 Degree Laser Range Scanner [Электронный ресурс]. URL: <https://www.slamtec.com/en/Lidar/C1> (дата обращения: 10.03.2026).

Применение теории нечеткой логики для устранения недостатков в работе регулятора уровня в парогенераторе на АЭС с реактором ВВЭР-1000

Крайнюченко Артем Леонидович, студент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Москва)

В статье рассмотрено применение аппарата нечеткой логики для повышения качества регулирования уровня питательной воды в парогенераторе на АЭС с реактором ВВЭР-1000. Показано, что основной областью применения нечеткого регулятора является режим, в котором штатный РУПГ теряет часть информации о материальном балансе при отказе или недостоверности каналов измерения расхода. Предложена структура ПИ-подобного регулятора с двумя входными переменными: уровнем в ПГ и скоростью его изменения. Обоснованы требования к безударному включению, ограничению выходной команды и сохранению штатных защит.

Ключевые слова: парогенератор, РУПГ, нечеткая логика, функции принадлежности, фаззификация, дефаззификация, регулирующийся клапан.

Application of fuzzy logic theory to eliminate deficiencies in the operation of the steam generator level regulator at NPPs with VVER-1000 reactor

Abstract quality of feedwater level control in a steam generator of a nuclear power plant with a VVER-1000 reactor. It is shown that the main area of application of the fuzzy controller is the mode in which the standard control unit loses part of the information about the material balance in case of failure or unreliability of the flow measurement channels. The structure of a PI-like regulator with two input variables is proposed: the level in GHG and its rate of change. The requirements for shockless activation, limitation of the output command and preservation of standard protections are justified.

Регулятор уровня парогенератора (РУПГ) является одним из элементов автоматического управления, влияющих на устойчивость теплогидравлического режима энергоблока. В нормальном режиме штатный РУПГ использует не только сигнал уровня, но и дополнительные обратные связи, связанные с расходом питательной воды, расходом пара и положением регулирующего клапана. Такая структура позволяет учитывать материальный баланс и быстрее реагировать на изменение нагрузки.

Недостатки существующего регулирования наиболее заметны в переходных режимах, когда из-за отказа или недостоверности измерительных каналов расхода регулятор переходит к более ограниченной схеме работы. В этих условиях управление начинает сильнее зависеть от сигнала уровня, а сам уровень в ПГ является нелинейным технологическим параметром. На него влияют паросодержание, давление, расход пара, расход питательной воды и динамика регулирующего органа. Поэтому простая фиксированная настройка не всегда обеспечивает требуемое качество регулирования.

Теория нечеткой логики позволяет формализовать опыт оператора и инженерные правила управления в виде лингвистических зависимостей типа «если — то». В отличие от жесткого численного закона, нечеткий регулятор допускает плавный переход между качественными состояниями: «уровень ниже нормы», «уровень номинальный», «уровень выше нормы», «уровень растет» или «уровень снижается». Такое описание соответствует характеру реального технологического процесса, в котором границы между состояниями обычно не являются резкими.

В качестве базовой структуры (см. рисунок 1) целесообразно рассматривать нечеткий ПИ-подобный регулятор с двумя входными переменными: фактическим уровнем L и скоростью изменения уровня v . При постоянной уставке $L_{зад} = 270$ мм использование фактического уровня эквивалентно описанию через ошибку $e = L_{зад} - L$. Скорость изменения уровня характеризует тенденцию процесса и связана со скоростью изменения ошибки противоположным знаком.

$$e(k) = L_{зад} - L(k); v(k) = [L(k) - L(k-1)] / \Delta t; \Delta e(k) / \Delta t = -v(k).$$

Выходной переменной такого регулятора является нормированная команда направления и интенсивности перемещения регулирующего клапана. Положительное значение команды соответствует открытию клапана и увеличению подачи питательной воды, отрицательное — закрытию клапана. Перед выдачей на исполнительный механизм команда должна проходить через блок денормализации и штатные ограничения по диапазону положения РК и скорости его перемещения.

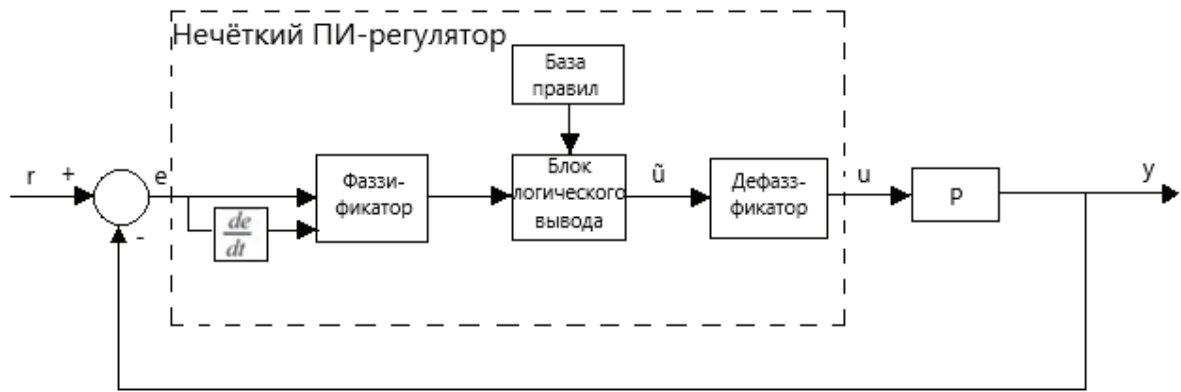


Рис. 1. Предлагаемая структура нечеткого регулятора уровня ПГ

Блок фаззификации переводит измеренные значения уровня и скорости изменения уровня в степени принадлежности соответствующим термам. База правил формирует логическое решение, а дефаззификация преобразует нечеткий результат в числовую команду. Для промышленной реализации предпочтительны треугольные и трапециевидальные функции принадлежности (см. рисунок 2), поскольку они просты для программной реализации и требуют небольших вычислительных затрат.

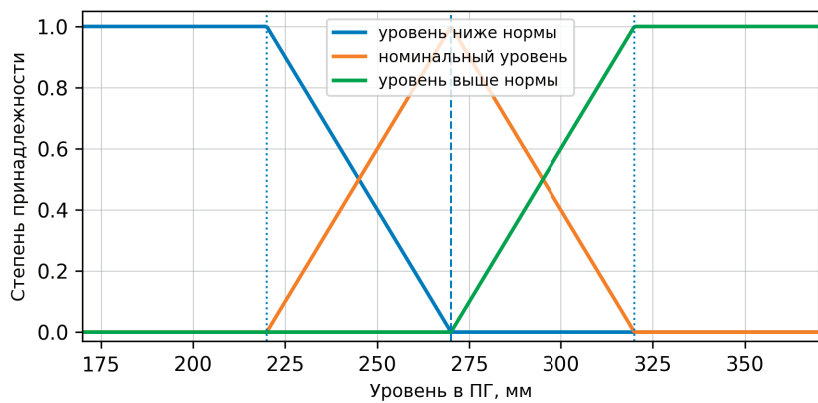


Рис. 2. Пример функций принадлежности для входной переменной «уровень в ПГ»

Таблица 1 показывает связь между выявленными недостатками штатного РУПГ и возможностями их компенсации средствами нечеткой логики. Основное преимущество РНЛ состоит в том, что управляющее воздействие формируется не только по текущему значению уровня, но и по характеру его изменения. Это позволяет учитывать нелинейность объекта, потерю части обратных связей при отказе расходомерных каналов, особенности безударного переключения и ограничения регулирующего клапана. Таким образом, нечеткий регулятор может рассматриваться как средство повышения адаптивности управления в наиболее неблагоприятных переходных режимах.

Таблица 1. Соответствие выявленных недостатков и средств нечеткого регулирования

Недостаток штатного регулирования	Проявление в переходном режиме	Средство компенсации в РНЛ
Нелинейность объекта	Реакция уровня зависит от режима мощности, давления и паросодержания	Использование лингвистических правил для разных состояний объекта
Потеря сигналов расхода	Переход к ограниченной структуре обратной связи	Опора на уровень и скорость его изменения при контроле достоверности сигналов
Безударное переключение	Возможное временное снижение активности регулятора	Согласование внутреннего состояния регулятора с текущим положением РК
Ограничения РК	Поздняя команда не всегда быстро компенсирует предыдущее открытие клапана	Денормализация команды с учетом диапазона и скорости перемещения РК

Из таблицы 2 видно, что управляющее воздействие определяется не только абсолютным отклонением уровня от номинального значения, но и тенденцией его изменения. Если уровень находится ниже нормы и продолжает снижаться, регулятор должен формировать более интенсивное открытие клапана. Если уровень выше нормы и продолжает расти, управляющее воздействие смещается в сторону интенсивного закрытия. При малых отклонениях и устойчивой тенденции допускается удержание или слабое корректирующее воздействие.

Таблица 2. Фрагмент базы правил для двух входных переменных

Состояние уровня	Уровень снижается	Уровень стабилен	Уровень растёт
Ниже нормы	Открыть сильно	Открыть	Удерживать / открыть слабо
Номинальный	Открыть слабо	Удерживать	Заккрыть слабо
Выше нормы	Удерживать / закрыть слабо	Заккрыть	Заккрыть сильно

С точки зрения безопасности предлагаемый алгоритм не должен заменять штатные защиты, блокировки и диагностику измерительных каналов. Его следует рассматривать как надстроечный элемент улучшения качества регулирования в допустимых технологических пределах. Включение РНЛ допустимо только при достоверном сигнале уровня и исправном канале положения регулирующего клапана; при отказе канала уровня применение такого регулятора недопустимо.

Таким образом, применение теории нечеткой логики для РУПГ энергоблока № 5 Нововоронежской АЭС обосновано нелинейностью объекта, изменением структуры обратных связей при отказе расходомерных каналов и необходимостью учитывать не только величину отклонения уровня, но и направление развития процесса. Предложенная структура с входами по уровню и скорости его изменения позволяет сформировать физически интерпретируемую базу правил и является основой для последующего имитационного моделирования, подбора функций принадлежности и оценки качества переходных процессов.

Литература:

1. Демидова Г. Л., Лукичев Д. В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 81 с.
2. Zadeh L. A. Fuzzy Sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. No. 3. P. 338–353.
3. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // International Journal of Man-Machine Studies. 1975. Vol. 7. No. 1. P. 1–13.
4. Техническое описание регулятора уровня парогенератора энергоблока № 5 Нововоронежской АЭС.

Исследование вторичных источников энергии с использованием компьютерных технологий

Мухамедов Абдушукур Абдугафурович, доцент;
 Ерназаров Шамсиддин Норчаевич, старший преподаватель;
 Исаев Фазлитдин Файзуллаевич, старший преподаватель;
 Абдуразаков Хуршиджон Тургунбой угли, ассистент
 Ташкентский химико-технологический институт (Узбекистан)

Данная работа посвящена вопросам эффективного использования энергетических ресурсов в современных энергетических системах, а также выявления, оценки и повторного использования вторичных источников энергии. В работе проведён анализ энергетических потерь, возникающих в промышленности, транспорте и других технологических процессах, а их физическая сущность рассмотрена на основе законов термодинамики. В работе обоснованы возможности применения методов математического моделирования для описания энергетических процессов, расчёта тепловых потоков и оценки эффективности энергетических систем. Кроме того, рассмотрена роль компьютерных технологий, включая программы имитационного моделирования и методы анализа на основе искусственного интеллекта, в оптимизации энергетических систем. Особое внимание уделено вопросам контроля энергетических потоков и снижения потерь энергии посредством систем мониторинга в реальном времени и технологий Интернета вещей (IoT).

Ключевые слова: вторичные источники энергии, энергетические системы, энергоэффективность, тепловая энергия, математическое моделирование, симуляция, искусственный интеллект, большие данные (Big Data), технологии Интернета вещей (IoT), энергетические потери, оптимизация, термодинамика.

Введение

В современных энергетических системах рациональное и эффективное использование энергетических ресурсов является одной из важнейших научных и практических задач, стоящих перед человечеством. Стремительное развитие промышленности, усиление процессов урбанизации и постоянный рост мирового потребления энергии обуславливают необходимость максимально эффективного использования существующих источников энергии. Наряду с этим всё более актуальной становится задача сокращения энергетических потерь, возникающих в процессе производства и потребления энергии, а также их переработки и возврата в энергетическую систему.

Одним из перспективных направлений решения данной проблемы является использование вторичных источников энергии (ВИЭ). Под вторичными источниками энергии понимаются виды энергии, образующиеся в результате основных технологических процессов и зачастую выбрасываемые в окружающую среду либо теряемые без полезного использования. К ним относятся потоки отходящего тепла, газы высокого давления, механические вибрации, избыточная электрическая энергия, а также энергия, выделяющаяся в результате химических реакций. Научные исследования показывают, что во многих промышленных системах от 20 до 50 % общей энергии теряется именно в виде вторичных энергетических ресурсов.

Особое значение имеют тепловые потоки, возникающие в ходе технологических процессов. При обработке материалов в высокотемпературной среде, в процессах сгорания топлива или в системах теплообмена значительная часть энергии рассеивается в окружающую среду. Такая энергия зачастую обладает низким энергетическим потенциалом и недостаточной концентрацией для непосредственного использования. Тем не менее современные теплообменники, рекуператоры и термоэлектрические генераторы позволяют эффективно восстанавливать и использовать данную энергию повторно. С научной точки зрения такие процессы описываются законами теплопроводности, конвекции и теплового излучения, а их эффективность определяется температурным градиентом и параметрами окружающей среды. В технологических системах энергия механического характера также представляет собой важный вторичный энергетический ресурс. В движущихся узлах, вращающихся механизмах и устройствах, работающих под давлением, часть энергии теряется в виде вибраций, ударных воздействий или избыточного давления. Обычно такие потери рассматриваются как фактор, снижающий эффективность системы. Однако данную энергию можно преобразовывать в электрическую с помощью специальных пьезоэлектрических элементов или устройств сбора энергии. Это направление особенно активно развивается в микроэлектронике и медицинской технике, где использование механических колебаний малой амплитуды позволяет создавать автономные

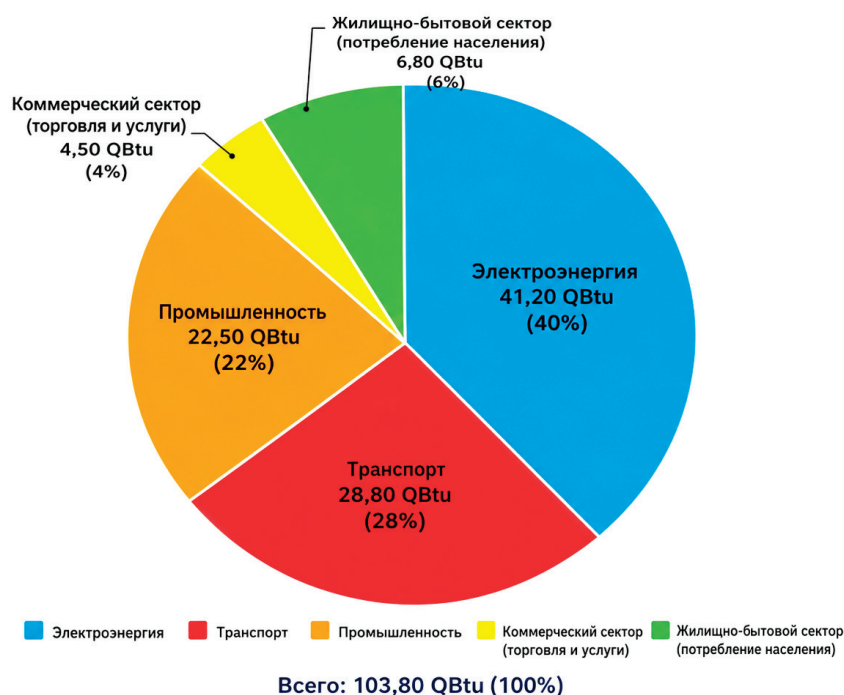


Рис. 1. Потребление энергии по отраслям (2026 г.)

источники питания. Такие решения способствуют повышению энергоэффективности устройств и снижению их зависимости от традиционных источников энергии.

Особого внимания заслуживает энергия, выделяющаяся в результате химических процессов. В составе отходящих газов, образующихся в различных производственных процессах, нередко сохраняются горючие компоненты. Их повторное сжигание или каталитическая переработка позволяют получать дополнительную энергию. Кроме того, некоторые химические реакции являются экзотермическими и сопровождаются выделением значительного количества тепла, которое может использоваться в качестве дополнительного энергетического ресурса. Для повышения эффективности таких систем важное значение имеют анализ состава газов, моделирование кинетики химических реакций и определение оптимальных условий их протекания. С практической точки зрения значительные объёмы вторичных энергетических ресурсов образуются в различных отраслях промышленности. На предприятиях тяжёлой промышленности широко распространены высокотемпературные отходящие потоки, тогда как в транспортных средствах существенные энергетические потери возникают в процессе работы двигателей. Эффективное использование данных ресурсов позволяет снизить общее энергопотребление и повысить производственную эффективность. Таким образом, вторичные источники энергии имеют различную физическую природу, и каждый из них требует применения специальных научных подходов к исследованию. Их комплексное изучение и интеграция с современными технологиями открывают широкие возможности для существенного повышения эффективности энергетических систем. Математическое моделирование является одним из основных инструментов исследования вторичных ис-

точников энергии. Данный подход позволяет описывать реальные физические процессы с помощью математических уравнений и анализировать их в компьютерной среде. Особенно широко при оценке тепловой энергии используются формулы, основанные на классических законах термодинамики. Наиболее простое и фундаментальное выражение для определения количества тепловой энергии задаётся следующим уравнением:

$$Q = mc\Delta T$$

В данной формуле:

Q — количество теплоты, поглощённое или выделенное веществом (Джоуль, Дж);

m — масса вещества (килограмм, кг);

c — удельная теплоёмкость вещества (Дж/(кг·К));

ΔT — изменение температуры, то есть разность между конечной и начальной температурами (Кельвин, К или °С).

Данное уравнение имеет важное значение при расчёте вторичной тепловой энергии, поскольку позволяет определить количество тепла, образующегося в ходе технологических процессов. Например, энергетический потенциал потока горячей жидкости или газа, выходящего из промышленного оборудования, оценивается именно на основе этой формулы. В процессе математического моделирования данное уравнение используется не изолированно, а как составная часть более сложных систем уравнений. В реальных условиях передача тепла осуществляется одновременно несколькими механизмами — теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением. Поэтому в компьютерных моделях формируется система дифференциальных уравнений, учитывающая влияние всех перечисленных факторов, которая затем решается с использованием численных методов.

Следует особо отметить, что чем больше значение ΔT , тем выше потенциальный объём вторичной тепловой

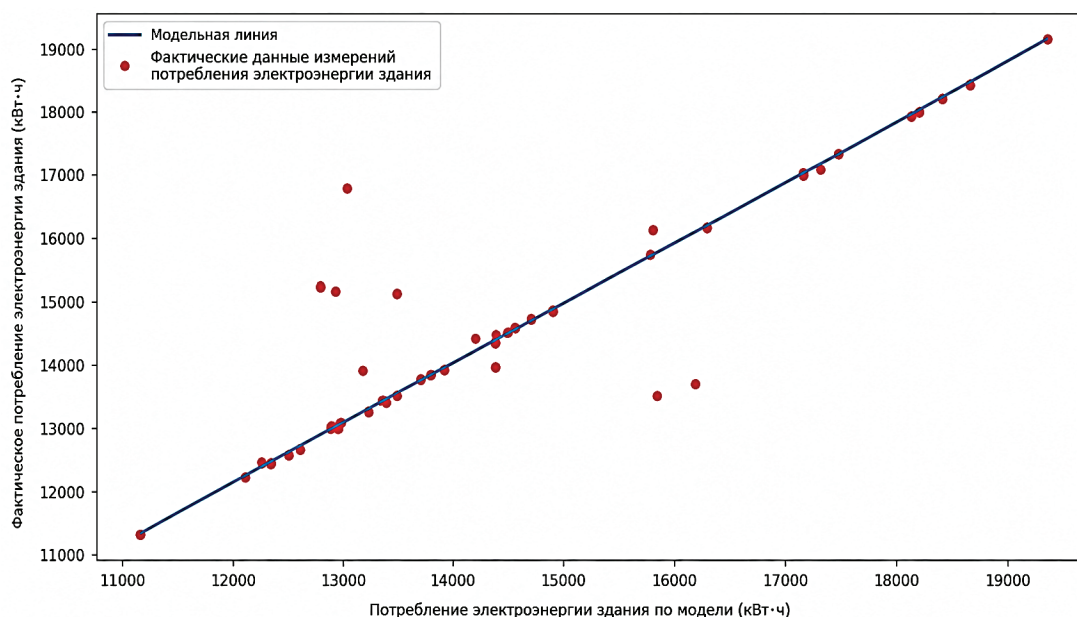


Рис. 2. Профессиональная диаграмма рассеяния (Scatter Plot), демонстрирующая результаты модели прогнозирования потребления электрической энергии

энергии, содержащейся в системе. Однако на практике эффективность повторного использования тепла зависит не только от разности температур, но и от физических свойств среды, условий теплообмена и конструктивных особенностей технологического оборудования. С помощью компьютерных технологий данные параметры могут рассчитываться в режиме реального времени, моделироваться различные сценарии функционирования системы и определяться оптимальные способы рекуперации энергии. В результате математическое моделирование выступает не только инструментом теоретических расчётов, но и важным средством проектирования, оптимизации и совершенствования современных энергетических систем.

Технологии симуляции представляют собой важное научное направление, позволяющее исследовать сложные энергетические процессы безопасным и экономически эффективным способом. При этом вместо реальных объектов создаются их цифровые (виртуальные) модели, а различные режимы работы анализируются и тестируются с использованием компьютерных средств. В результате значительно сокращаются временные и материальные затраты, необходимые для проведения экспериментов, одновременно обеспечивая возможность глубокого анализа поведения исследуемой системы. Современные программные среды позволяют изучать энергетические системы на основе многоуровневого подхода. С помощью вычислительных пакетов системы дифференциальных уравнений решаются численными методами, что позволяет определять энергетические потоки, процессы распространения тепла и динамику энергетических потерь. Такие программные средства обеспечивают высокоточную пространственно-временную модель фи-

зических процессов, позволяют оценивать чувствительность системы к изменению параметров и находить оптимальные режимы её функционирования.

Заключение

С помощью специализированных инженерных платформ в комплексе исследуются процессы движения жидкостей, теплообмена и структурных нагрузок. Это имеет особенно важное значение при проектировании устройств для утилизации и повторного использования вторичных источников энергии, поскольку в таких системах одновременно протекают несколько взаимосвязанных физических процессов. Мультифизические модели позволяют с высокой точностью описывать процессы преобразования энергии из одной формы в другую и анализировать их взаимное влияние. Системы, основанные на интеграции аппаратного и программного обеспечения, обеспечивают мониторинг и управление в режиме реального времени. Данные, поступающие от датчиков, непрерывно обрабатываются, оценивается текущее состояние системы и, при необходимости, автоматически вносятся корректирующие воздействия. Это позволяет оперативно выявлять энергетические потери и принимать меры по их минимизации. Таким образом, технологии симуляции и современные программные средства выполняют роль важнейшего связующего звена между теоретическими расчётами и практическими результатами при исследовании вторичных источников энергии. Их применение способствует повышению эффективности энергетических систем, разработке новых технологических решений и оптимизации существующих производственных процессов.

Литература:

1. Moran M. J., Shapiro H. N., Boettner D. D., Bailey M. B. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. — 9th ed. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2018. — 896 p.
2. Bejan A. Advanced Engineering Thermodynamics. — 4th ed. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2016. — 848 p.
3. Dincer I., Rosen M. A. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. — 3rd ed. — Oxford: Elsevier, 2021. — 816 p.
4. Klemeš J. J. Handbook of Process Integration (PI): Minimisation of Energy and Water Use, Waste and Emissions. — 2nd ed. — Cambridge: Woodhead Publishing, 2022. — 1350 p.
5. Smith R. Chemical Process Design and Integration. — 3rd ed. — Chichester: Wiley, 2016. — 918 p.
6. Kalogirou S. A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. — 3rd ed. — Academic Press, 2020. — 760 p.
7. Lund H. Renewable Energy Systems: A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of 100 % Renewable Solutions. — 3rd ed. — Academic Press, 2022. — 672 p.
8. Wang L. Energy Efficiency and Management in Industry. — Boca Raton: CRC Press, 2021. — 412 p.
9. Zhou K., Fu C., Yang S. Big Data Driven Smart Energy Management: From Big Data to Big Insights // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2016. — Vol. 56. — P. 215–225.
10. Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M., Aledhari M., Ayyash M. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols and Applications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2015. — Vol. 17, No. 4. — P. 2347–2376.
11. Minoli D., Sohraby K., Occhiogrosso B. IoT Considerations, Requirements and Architectures for Smart Buildings — Energy Optimization and Next-Generation Building Management Systems // IEEE Internet of Things Journal. — 2017. — Vol. 4, No. 1. — P. 269–283.
12. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. — Cambridge: MIT Press, 2016. — 800 p.

Исследование влияния цветных металлов в составе глины Корниловского месторождения для защиты от электромагнитных волн

Сигаев Алексей Николаевич, студент;

Федоров Артур Евгеньевич, студент;

Чех Никита Иванович, студент;

Куликов Даниил Евгеньевич, аспирант

Научный руководитель: Апкарьян Афанасий Саакович, доктор технических наук, профессор
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

В статье представлено исследование электромагнитных характеристик керамического материала на основе беложгущейся глины Корниловского месторождения с добавлением цветных металлов.

Ключевые слова: беложгущаяся глина Корниловского месторождения, цветные металлы, радиопоглощающий материал, электромагнитное излучение, коэффициент поглощения, коэффициент отражения.

Введение

Керамические материалы на основе глинистого сырья широко применяются в качестве радиопоглощающих и экранирующих покрытий благодаря их доступности, технологичности и стабильности свойств при высоких температурах [1, с. 199; 2, с. 36]. Известно, что структура и состав глин оказывают существенное влияние на формирование физико-технических характеристик, включая диэлектрические параметры и электропроводность [3, с. 112; 5, с. 418].

В последние годы особый интерес представляет модификация глинистых материалов за счет введения проводящих фаз, в частности цветных металлов, что позволяет целенаправленно управлять электромагнитными свойствами композитов [1, с. 202; 4, с. 89]. Введение в структуру керамики таких металлов, как свинец (Pb) и медь (Cu), приводит к изменению диэлектрической проницаемости, удельной проводимости и, как следствие, коэффициентов отражения и поглощения электромагнитного излучения.

Эффективность радиопоглощающих материалов определяется балансом между диэлектрическими потерями и проводимостью, что связано с достижением так называемого перколяционного порога проводящей фазы [4, с. 90]. При этом глины локальных месторождений, в том числе Корниловского, рассматриваются как перспективная матрица для создания функциональных композиционных материалов [2, с. 38; 5, с. 420].

Задачи:

- разработать керамический материал на основе беложгущейся глины Корниловского месторождения с добавлением цветных металлов для защиты от электромагнитных волн;
- определить варианты применения материала;
- исследовать глинистые материалы Корниловского месторождения;
- исследовать влияние электромагнитного излучения на человека;
- разработать состав шихты и температурный регламент при производстве материала для защиты от электромагнитных волн на основе беложгущейся глины и цветных металлов.

Материалы и методы исследований

Для проведения исследования применены три образца глины Корниловского месторождения со свинцом и три — с медью. Пробы материалов обозначены как ОСВ-1, ОСВ-2, ОСВ-3, ОМ-1, ОМ-2 и ОМ-3. При исследовании использованы следующие методы:

- метод фильтрации спектра (S-параметры) — определение коэффициента поглощения материала в диапазоне частот 0–18 ГГц;
- метод TDR (Time Domain Reflectometry) — регистрация отраженного сигнала для оценки коэффициента отражения.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Основой шихты является беложгущаяся глина Корниловского месторождения. В нее вводились цветные металлы в различной концентрации: свинец — 20, 30 и 40 %; медь — 20, 30 и 40 %. Для всех образцов была проведена одинаковая технология подготовки: смешивание, формование, сушка, обжиг при 1250 °С.

Для исследования использовали результаты определения огнеупорности глинистого материала с добавлением цветных металлов с целью использования материала в условиях высоких температур (табл. 1 и 2). Обжиг проводился на электрической печи производства компании «Накал — Промышленные печи».

Таблица 1. Результаты определения огнеупорности глинистого материала с добавлением свинца

№ пробы	Содержание свинца, %	Температура испытания, °С
ОСВ-1	20	1250
ОСВ-2	30	1250
ОСВ-3	40	1250

Таблица 2. Результаты определения огнеупорности глинистого материала с добавлением меди

№ пробы	Содержание меди, %	Температура испытания, °С
ОМ-1	20	1250
ОМ-2	30	1250
ОМ-3	40	1250

Дополнительной характеристикой структуры исследуемых материалов является влагопоглощение, позволяющее косвенно оценить пористость и степень уплотнения керамической матрицы. Данный параметр оказывает влияние на эксплуатационные и электромагнитные свойства материалов. Результаты определения влагопоглощения исследуемых образцов представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3. Результаты определения влагопоглощения образцов с добавлением свинца

№ пробы	Содержание свинца, %	Показатель влагопоглощения, %
ОСВ-1	20	13,2
ОСВ-2	30	19,1
ОСВ-3	40	20

Таблица 4. Результаты определения влагопоглощения образцов с добавлением меди

№ пробы	Содержание меди, %	Показатель влагопоглощения, %
ОМ-1	20	5,9
ОМ-2	30	3,7

Полученные значения показателя влагопоглощения позволяют дополнительно интерпретировать выявленные закономерности изменения электромагнитных характеристик исследуемых материалов. Известно, что уровень влагопоглощения косвенно отражает степень открытой пористости и структурной неоднородности керамики, которые оказывают существенное влияние на процессы распространения и затухания электромагнитных волн.

Для образцов с добавлением свинца (табл. 3) наблюдается увеличение влагопоглощения с ростом концентрации металлической фазы, что может свидетельствовать о формировании более развитой пористой структуры. Повышенная пористость способствует увеличению многократного рассеяния электромагнитной волны внутри материала, однако при избыточной проводимости (40 %) это приводит к росту отражения, что согласуется с ранее полученными результатами.

В случае образцов с медью (табл. 4) зафиксировано снижение влагопоглощения при увеличении концентрации, что указывает на уплотнение структуры и уменьшение объема открытых пор. Такая структура способствует более эффективному согласованию волнового сопротивления и снижению отражения, особенно при концентрации 30 %, где наблюдаются наилучшие радиопоглощающие характеристики.

Таким образом, влагопоглощение может рассматриваться как косвенный параметр, характеризующий микроструктуру материала и влияющий на его электромагнитные свойства. Оптимальные значения достигаются при балансе между пористостью, обеспечивающей рассеяние и поглощение энергии, и проводимостью, определяющей уровень отражения, что согласуется с представлениями о влиянии пористости на электрофизические свойства керамических материалов [3].

Для оценки механических свойств исследуемых образцов были проведены испытания, результаты которых представлены на рис. 1–5.

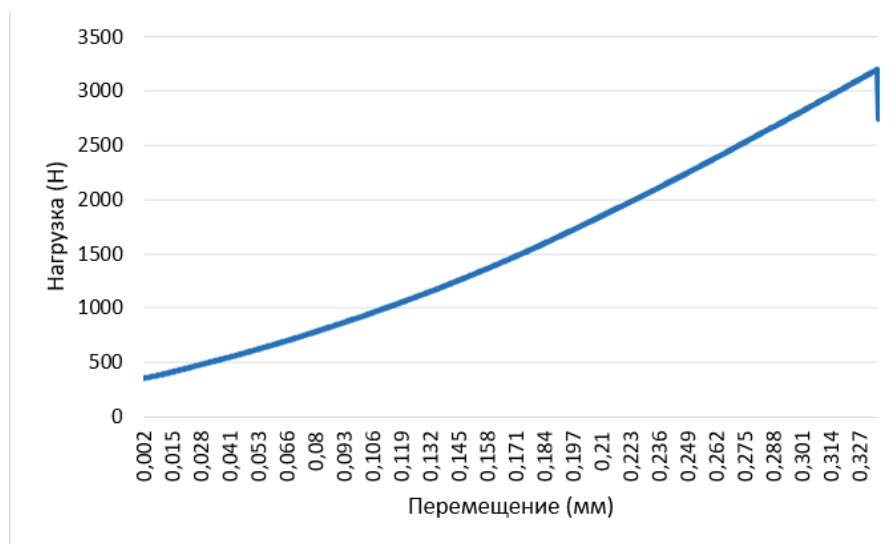


Рис. 1. Механическая прочность образца с содержанием свинца 20 %

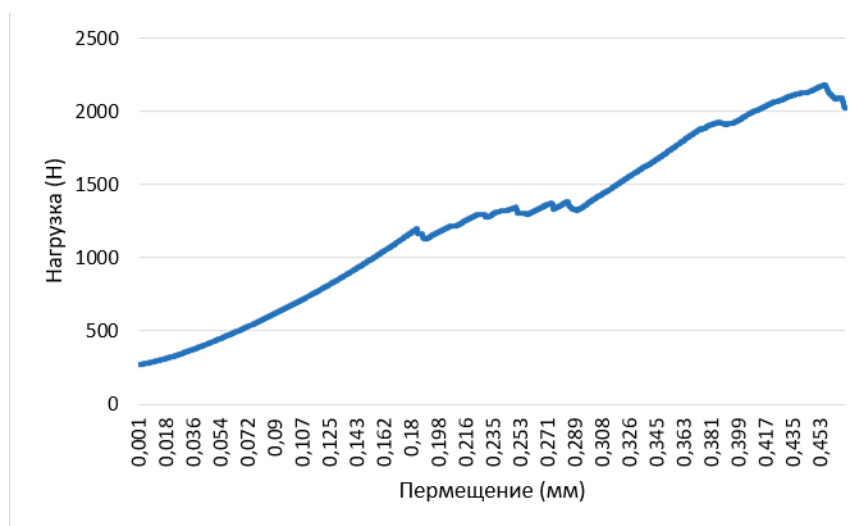


Рис. 2. Механическая прочность образца с содержанием свинца 30 %

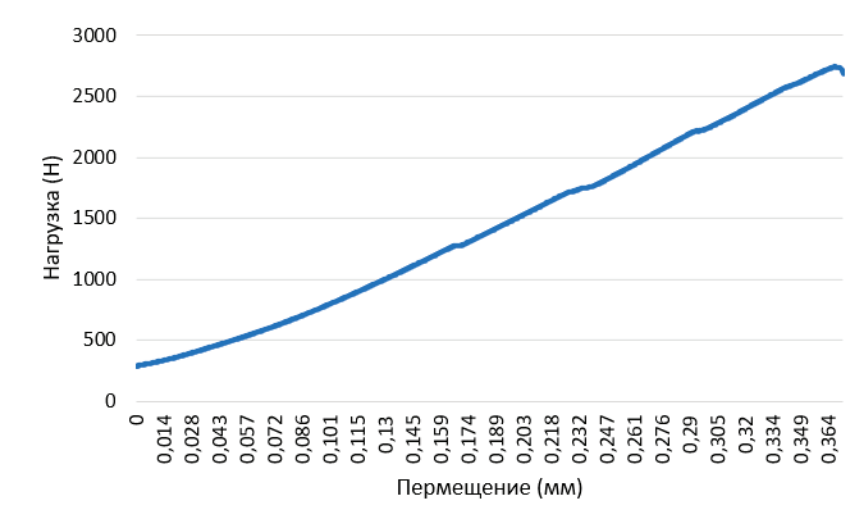


Рис. 3. Механическая прочность образца с содержанием свинца 40 %

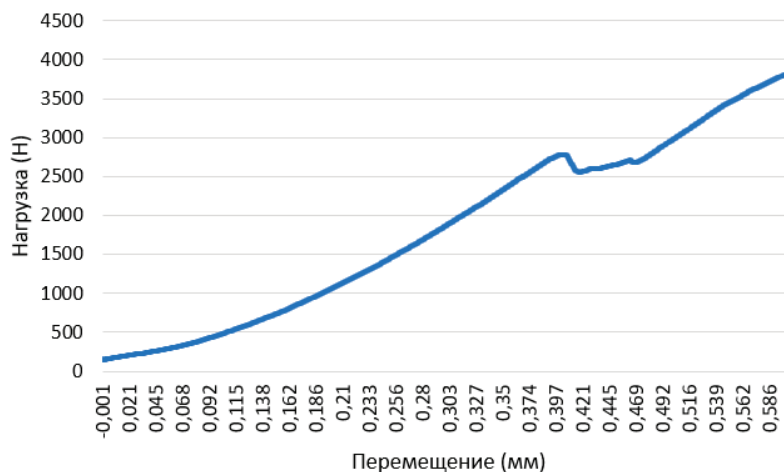


Рис. 4. Механическая прочность образца с содержанием меди 20 %

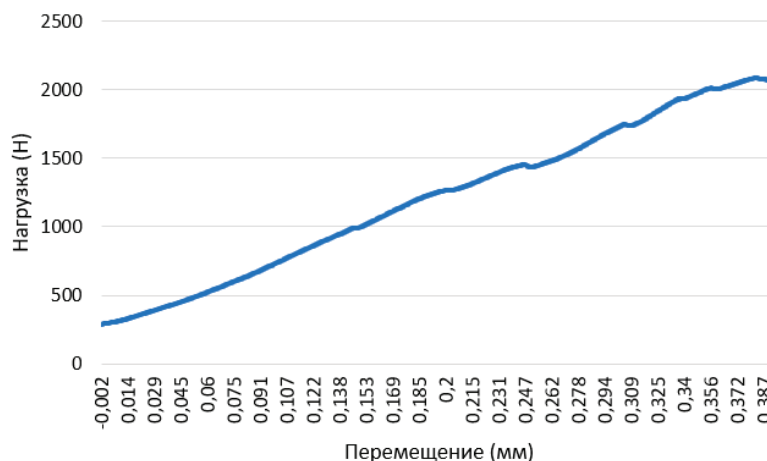


Рис. 5. Механическая прочность образца с содержанием меди 30 %

Анализ результатов механических испытаний (рис. 1–5) показывает, что введение цветных металлов оказывает существенное влияние на прочностные характеристики керамического материала.

Для образцов с добавлением свинца (рис. 1–3) наблюдается увеличение механической прочности при увеличении его содержания с 20 до 30 %, что связано с более равномерным распределением металлической фазы и формированием плотной структуры материала. Однако при дальнейшем увеличении содержания свинца до 40 % отмечается тенденция к снижению прочностных характеристик, что может быть обусловлено возникновением внутренних напряжений и неоднородностей структуры.

Аналогичная зависимость наблюдается для образцов с медью (рис. 4–5): максимальные значения прочности достигаются при концентрации 30 %, тогда как при меньших концентрациях материал обладает недостаточной связностью структуры, а при более высоких проявляется эффект переуплотнения и локальной неоднородности.

Таким образом, установлено (рис. 1–5), что оптимальная концентрация металлической добавки (30 %) обеспечивает не только максимальные электромагнитные характеристики, но и наилучшие механические свойства, что подтверждает согласованность данных с результатами анализа электромагнитных характеристик.

Совокупный анализ полученных данных показывает, что электромагнитные, структурные и механические характеристики материала взаимосвязаны и определяются концентрацией металлической фазы. Оптимальная концентрация на уровне 30 % обеспечивает баланс между пористостью, электропроводностью и механической прочностью, что является ключевым фактором при разработке эффективных радиопоглощающих материалов.

Заключение

В ходе проведенного исследования установлено, что введение цветных металлов (свинца и меди) в состав белой жгущейся глины Корниловского месторождения по-

звolyет целенаправленно управлять электромагнитными, структурными и механическими свойствами керамического материала.

Экспериментально подтверждено, что изменение концентрации металлической фазы приводит к нелинейному изменению коэффициентов отражения и поглощения электромагнитного излучения, что обусловлено изменением соотношения диэлектрических потерь и электропроводности.

Установлено, что оптимальные характеристики достигаются при концентрации 30 %, при которой обеспечивается максимальное поглощение электромагнитных волн, минимизация отражения и наилучшие механические свойства материала.

Показано, что влагопоглощение может рассматриваться как косвенный параметр, характеризующий микроструктуру материала и оказывающий влияние на его электромагнитные свойства через изменение пористости и плотности структуры.

Практическая значимость работы заключается в разработке композиционного материала на основе доступного природного сырья, пригодного для использования в радиопоглощающих покрытиях, экранирующих конструкциях и элементах защиты от электромагнитного излучения.

Перспективы дальнейших исследований связаны с оптимизацией состава, изучением влияния других типов модифицирующих добавок и расширением диапазона рабочих частот.

Литература:

1. Апкарьян А. С., Куликов Д. Е. Исследование физико-технических свойств композиционного высокотемпературного теплоизоляционного материала на основе беложгущейся глины Корниловского месторождения Томской области // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2025. — Т. 27, № 2. — С. 198–205. — DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-198-205.
2. Апкарьян А. С., Саблина Т. Ю. Физико-технические свойства глины Корниловского месторождения Томской области // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2022. — Т. 65, № 7. — С. 35–41. — DOI: 10.17223/00213411/65/7/35.
3. Осипов В. И., Соколов В. Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. — Москва : ГЕОС, 2013. — 578 с.
4. Тарасов С. П., Куценко А. Н., Белоус Ю. В. Коэффициент отражения как информативный параметр для экологических исследований // Известия Южного федерального университета. Технические науки. — 2002. — Т. 29, № 6. — С. 87–91.
5. Яковлева А. А., Немчинова Н. В. Перспективы использования глин локального проявления в металлургической практике // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2019. — № 2 (145). — С. 415–425. — DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-415-425.

Использование робототехнических средств при ремонте и обслуживании тракторов

Сиренко Андрей Григорьевич, студент магистратуры
Дальневосточный государственный аграрный университет (г. Благовещенск)

В статье представлен анализ применения робототехнических средств в процессах ремонта и технического обслуживания тракторов. Рассмотрены интеллектуальные системы диагностики на базе компьютерного зрения, роботизированные комплексы для наплавки и 3D-сканирования деталей. Предложена классификация роботизированного оборудования по выполняемым операциям с оценкой экономической эффективности. Сделан вывод о целесообразности поэтапной роботизации ремонтных предприятий.

Ключевые слова: роботизация, ремонт тракторов, техническое обслуживание, компьютерное зрение, 3D-сканирование, коллаборативные роботы.

Using robotics in tractor repair and maintenance

The article presents an analysis of the application of robotic means in the processes of repair and maintenance of tractors. Intelligent diagnostic systems based on computer vision, robotic complexes for surfacing and 3D-scanning of parts are considered.

A classification of robotic equipment by operations with an assessment of economic efficiency is proposed. The conclusion is made about the expediency of step-by-step robotization of repair enterprises.

Keywords: robotics, tractor repair, maintenance, computer vision, 3D-scanning, collaborative robots.

Введение

Современное состояние агропромышленного комплекса характеризуется высоким уровнем износа машинно-тракторного парка. При этом ремонтные службы испытывают острый дефицит квалифицированных кадров, а объём ручного труда при ремонте достигает 60–70 % от общих трудозатрат. Единственным системным решением данной проблемы является внедрение робототехнических средств в процессы технического обслуживания и ремонта тракторной техники.

Цель работы — систематизация применяемых роботизированных решений, оценка их экономической эффективности и разработка рекомендаций по внедрению для ремонтных предприятий различного масштаба.

Материалы и методы. Исследование базируется на анализе научно-технической литературы, данных российских и зарубежных разработчиков, а также результатах практического внедрения роботизированного оборудования в 2024–2026 гг. Используются методы системного анализа, классификации и технико-экономического сравнения.

Результаты

По результатам анализа выделены пять основных направлений применения робототехники при ремонте и обслуживании тракторов.

1. Интеллектуальные системы диагностики на базе компьютерного зрения. Система Cognitive Agro Pilot (разработка российской компании Cognitive Pilot) обеспечивает автономное управление сельхозтехникой, распознавая участки культур, края поля и препятствия. Точность составляет 1–2 см при использовании RTK-коррекции и до 5 см без спутникового сигнала [1]. В 2025 году внедрена технология Cognitive Divergence Correction, повышающая устойчивость автопилотирования в сложных условиях. Система передаёт данные о ходе работ с борта по GSM-модему, что позволяет удалённо контролировать техническое состояние машин [1].

Для автоматизированной проверки электронных и мехатронных узлов автотракторной техники в 2025 году создан и внедрён комплекс из трёх стендов (САП-1, САП-2, САП-3), сочетающий компьютерное зрение, роботизированное управление и прецизионные электрические измерения. Новизна защищена патентами РБ № 13628 и 24365 [7].

2. Роботизированная наплавка при восстановлении деталей. Автоматизированный комплекс лазерной порошковой наплавки Lazerbuzz T-5000 на базе шестиосевого промышленного робота формирует покрытие с минимальной деформацией ремонтируемых изделий. Скорость наплавки в 2–5 раз выше по сравнению с ручной, твёрдость покрытия достигает 80 HRC, возможна наплавка слоя от 0,1 мм. Применение машинного зрения обеспечивает контроль качества в процессе выполнения работ [3].

3. 3D-сканирование для дефектовки и контроля геометрии. 3D-сканирование позволяет получить высокоточную цифровую модель детали, что значительно сокращает время на диагностику и планирование ремонта. Анализ состояния оборудования с помощью сканера помогает определять повреждения и отклонения от нормы, проводить мониторинг до возникновения серьёзных неисправностей [8].

В 2025 году компания «РТ-Техприемка» (Ростех) представила роботизированный комплекс «Кибермодуль 3D» на базе шестиосевого робота-манипулятора. Комплекс работает с объектами от 10 см до 12 метров, выполняя до 4,9 млн измерений в секунду, точность достигает ± 32 мкм, что значительно превышает возможности ручной проверки. Интеллектуальное ПО в реальном времени сравнивает детали с цифровыми эталонами и автоматически формирует отчёты [2].

Тракторный завод «ДСТ-УРАЛ» в 2026 году представил сервисный портал в составе цифровой экосистемы предприятия, позволяющий проводить интеллектуальную диагностику и сервисное сопровождение в режиме 24/7. Ранее предприятие продемонстрировало технологию удалённого управления роботизированной техникой с расстояния более 1000 км на основе 3D-карт местности, формируемых с помощью БПЛА с лидарами [6].

4. Автоматизированная сборка узлов. На заводах John Deere шестиосевые роботы собирают двигатели тракторов с высокой точностью. Робот сваривает раму комбайна за 20 минут, тогда как человеку требуется значительно больше времени. Опыт внедрения роботов на заводах John Deere и Claas подтверждает повышение точности, снижение себестоимости и ускорение выпуска продукции [4].

5. Коллаборативные роботы (коботы) и мобильные роботизированные системы. Для ремонтных мастерских малого и среднего масштаба оптимальным решением являются коботы. Цена таких систем для сборки и контроля качества начинается от 1,2 млн рублей, они не требуют защитных клеток и программируются за один день. При внедрении кобота для шлифовки деталей в малом цехе окупаемость достигается за 1,5–2 года [5].

По данным Future Market Insights, объём мирового рынка промышленной робототехники в 2025 году составил \$55 млрд, а к 2035 году ожидается рост до \$291 млрд. Рынок коллаборативных роботов в 2025–2026 гг. входит в фазу ускорения: прогнозируемый рост поставок на 2025 год составляет 20,6 % [5].

Классификация и оценка эффективности роботизированных средств ремонта тракторов. В таблице 1 представлена классификация роботизированных средств по технологическим операциям с экспертными оценками эффективности на основе данных 2025 года.

Таблица 1. Классификация и показатели эффективности роботизированных средств при ремонте тракторов

Операция	Тип оборудования	Снижение трудозатрат, %	Стоимость, млн руб.	Окупаемость, лет
Диагностика электронных узлов	Стенд с компьютерным зрением (САП-1–3)	60–70	по запросу	2,0–2,5
3D-контроль геометрии деталей	Роботизированный сканер «Кибермодуль 3D»	70–80	15–30	2,0–3,0
Лазерная наплавка	6-осевой робот Lazerbuzz T-5000	50–60	8–12	2,0–2,5
Автоматическая сборка узлов	Промышленный манипулятор (KUKA/Fanuc)	40–50	2,5–5,0*	2,0–3,0
Постремонтный контроль качества	Кобот с техническим зрением (UR/Doosan)	50–60	1,2–2,5	1,5–2,0

* — для коботов; для тяжёлых промышленных роботов стоимость выше.

Примечание: для малых предприятий (менее 100 тракторов в год) срок окупаемости увеличивается в 1,5–2 раза.

Все данные приведены для загрузки оборудования не менее 70 % в две смены.

Заключение

Применение робототехнических средств при ремонте и обслуживании тракторов — объективная необходимость, обусловленная дефицитом кадров, растущими требованиями к качеству ремонта и старением парка техники. Наиболее зрелыми являются решения для диагностики (в том числе на базе компьютерного зрения), восстановительной наплавки и контроля качества. Крупные ремонтные заводы могут себе позволить дорогостоящие комплексы типа «Кибермодуль 3D» или линии лазерной наплавки, а для малых и средних мастерских оптимальный путь — внедрение коботов и мобильных 3D-сканеров.

Дальнейшие исследования рекомендуется направить на разработку унифицированных методик оценки экономической эффективности роботизации ремонта, создание отраслевых стандартов роботизированных операций и интеграцию роботизированных средств в цифровые экосистемы ремонтных предприятий.

Литература:

1. Оф. сайт компании Cognitive Agro Pilot. — Текст: электронный // Cognitive Pilot: [сайт]. — URL: <https://cognitivepilot.com/products/cognitive-agro-pilot/> (дата обращения: 02.06.2026).
2. Ростех. Комплекс 3D-сканирования. Иннопром 2025. — Текст: электронный // Computerra: [сайт]. — URL: <https://www.computerra.ru/318502/rosteh-predstavil-na-innoprome-vysokotehnologichnyj-kompleks-3d-skanirovaniya/> (дата обращения: 02.06.2026).
3. Комплекс лазерной наплавки T-5000. — Текст: электронный // lazerbuzz.ru: [сайт]. — URL: <https://lazerbuzz.ru/product/kompleks-lazernoj-naplavki-t-5000/> (дата обращения: 02.06.2026).
4. Горбунов, А. В. Роботизированные системы в современном автомобилестроении / А. В. Горбунов, С. Н. Кравченко. — Текст: непосредственный // Актуальные научно-технические средства и сельскохозяйственные проблемы: XIII Национальная научно-практическая конференция. —, 2025. — С. 544.
5. Strong growth forecast collaborative robot shipments. — Текст: электронный // Interact Analysis: [сайт]. — URL: <https://interactanalysis.com/strong-growth-forecast-collaborative-robot-shipments/> (дата обращения: 02.06.2026).
6. ДСТ-Урал расширяет цифровую экосистему. — Текст: электронный // igrader.ru: [сайт]. — URL: <https://igrader.ru/rbt/dst-ural-rasshiryayet-czifrovuyu-ekosistemu/> (дата обращения: 02.06.2026).
7. Разработать комплекс программно-технических средств для автоматизированной проверки функциональных параметров электронных и мехатронных узлов автотракторной техники и внедрить на ОАО «ВЗЭП»: отчет

о НИР (заключительный): 643/ЦИТ-21/3 / УО «ВГТУ»; науч. рук. А. Г. Кириллов; исполн.: А. Н. Бизюк, М. С. Карнилов. — Витебск, 2025. — 98 с.

8. 6 главных тенденций в индустрии 3D-сканирования. — Текст: электронный // twize.ru: [сайт]. — URL: <https://twize.ru/articles/6-glavnykh-tendentsiy-v-industrii-3d-skanirovaniya/> (дата обращения: 02.06.2026).

9. Интеллектуальные системы управления сельхозтехникой. — Текст: электронный // servolux.com: [сайт]. — URL: <https://servolux.com/press/news/68> (дата обращения: 02.06.2026).

10. Выбор промышленного робота под нужды бизнеса. — Текст: электронный // ltrobotics.ru: [сайт]. — URL: <https://ltrobotics.ru/stati/blog/kak-vybrat-promyshlennogo-robota-pod-nuzhdy-biznesa/> (дата обращения: 02.06.2026).

**Анализ проектной документации как ключевой фактор,
обеспечивающий безопасное функционирование
опасных производственных объектов**

Чистохин Павел Александрович, студент магистратуры
Воронежский государственный технический университет

Жидко Елена Александровна, доктор технических наук, профессор
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)

В статье рассмотрены вопросы проведения строительно-технической экспертизы (СТЭ) проектной документации (ПД) для опасных производственных объектов (ОПО) на примере нефтяной, газовой и горнодобывающей отраслях. Проанализированы выявленные недочеты и ошибки на этапе проектирования и эксплуатации объектов. Рассмотрены основные технические и организационные причины высокой аварийности на ОПО.

Ключевые слова: строительно-техническая экспертиза, проектная документация, опасные производственные объекты, промышленная безопасность.

Проведение всестороннего анализа проектной документации (ПД) — это необходимый шаг для **гарантирования безопасной эксплуатации** опасных производственных объектов (ОПО). Качество ПД напрямую влияет на безопасность эксплуатации таких объектов. Строительно-техническая экспертиза (СТЭ) является основным механизмом проверки соответствия проектов требованиям промышленной безопасности [1,2]

ОПО, включают объекты нефтяной, газовой, горнодобывающей промышленности и многие другие отрасли.

Актуальность темы продиктована высокой аварийностью на ОПО, вызванной разными причинами (табл.) [3], в том числе и ошибками проектирования. В результате проведенного анализа основными техническими и орга-

низационными причинами высокой аварийности на ОПО являются причины, представленные на рис.1 [4].

По ежегодным данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору были собраны, упорядочены и изучены статистические показатели аварийности на производственных площадках нефтехимических, нефтеперерабатывающих производств и объектах нефтепродуктообеспечения на территории РФ за период 2020–2024 гг. (рис.2) [3,4].

В 2023 году Ростехнадзор зафиксировал, что около 30 % инцидентов в нефтегазовом комплексе произошли из-за нарушений на стадии проектирования и разработки ПД.

Безопасность эксплуатации ОПО напрямую зависит от качества ПД. СТЭ — это главный инструмент, подтвер-

Таблица 1. Аварии и несчастные случае на ОПО в 2023–2024 г.г

Вид объекта надзора	Аварии		Погибшие в результате аварии	
	2023 г.	2024 г.	2023 г.	2024 г.
Горнорудная и нерудная промышленности	1	3	1	14
Нефтегазодобывающая промышленность	5	8	9	6
Нефтехимическая, нефтегазоперерабатывающая промышленность	3	8	1	4
Объекты ведения горных работ (шахты, подземные и горные выработки)	1	10	-	-
Объекты нефтегазового комплекса	8	8	-	-

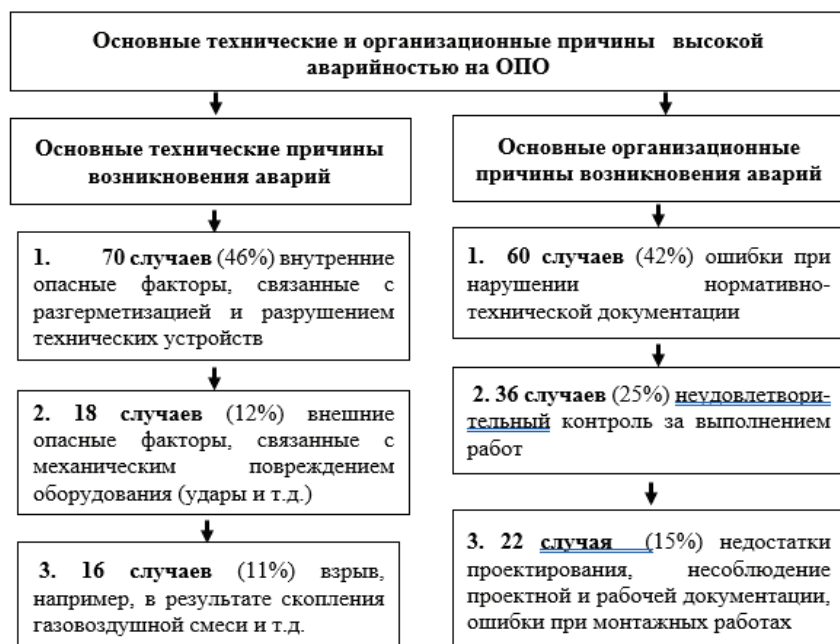


Рис. 1. Основные технические и организационные причины высокой аварийности на ОПО

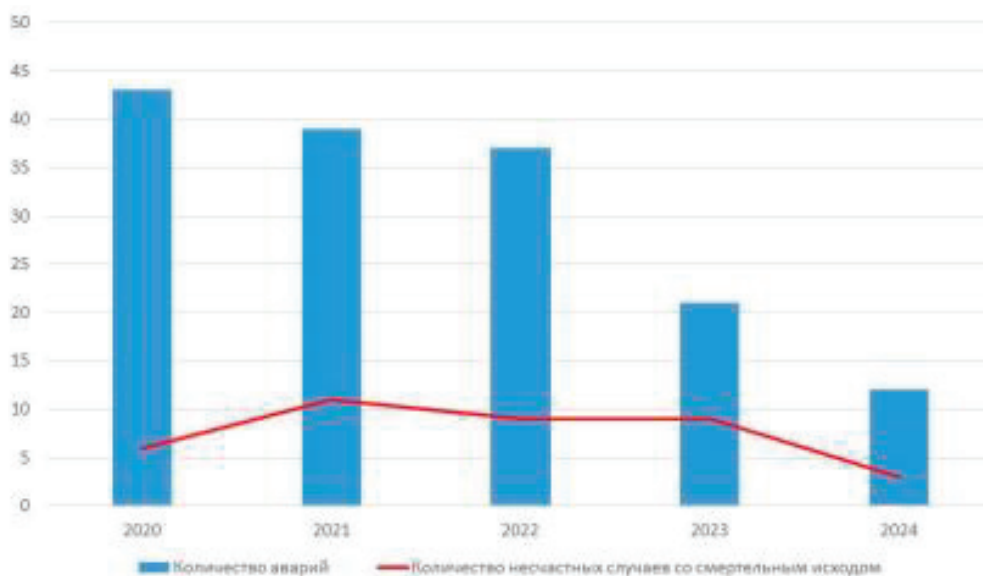


Рис. 2. Динамика аварийности и смертельного травматизма на ОПО в 2020–2024 гг.

ждающий соответствие проектов требованиям промышленной безопасности.

Для обеспечения соответствия проекта обязательным требованиям и установленным нормам проводится государственная экспертиза ПД.

Этот комплексный процесс, является ключевым этапом и направлен на подтверждение того, что проект отвечает санитарно-эпидемиологическим, экологическим и другим стандартам. В рамках экспертизы также проверяется, согласуется ли ПД с данными инженерных изысканий и соблюдены ли нормы пожарной, промышленной, радиационной и других видов безопасности [5,6].

Ошибки в ПД могут приводить к значительным ущербам, снижению эффективности строительства и эксплуатации

ОПО, к возникновению штатных и аварийных ситуаций, а также к увеличению травматизма на рабочих местах.

Типовые замечания можно структурировать в соответствии с разделами проектной документации (рис.3) [7].

Рассмотрим распространённые недочёты и ряд характерных ошибок, которые обнаруживаются при проверке ПД при планировании консервации и ликвидации ОПО на примере нефтегазовой отрасли (рис.4) и на объектах ведения горных работ (рис.5).

Практически ни один комплект ПД не обходится без доработок в ходе экспертизы — не исключая проектов, которые в итоге получают положительное заключение. Они предварительно обязательно проходят этап коррективов.



Рис. 3. Типовые замечания в соответствии с разделами проектной документации

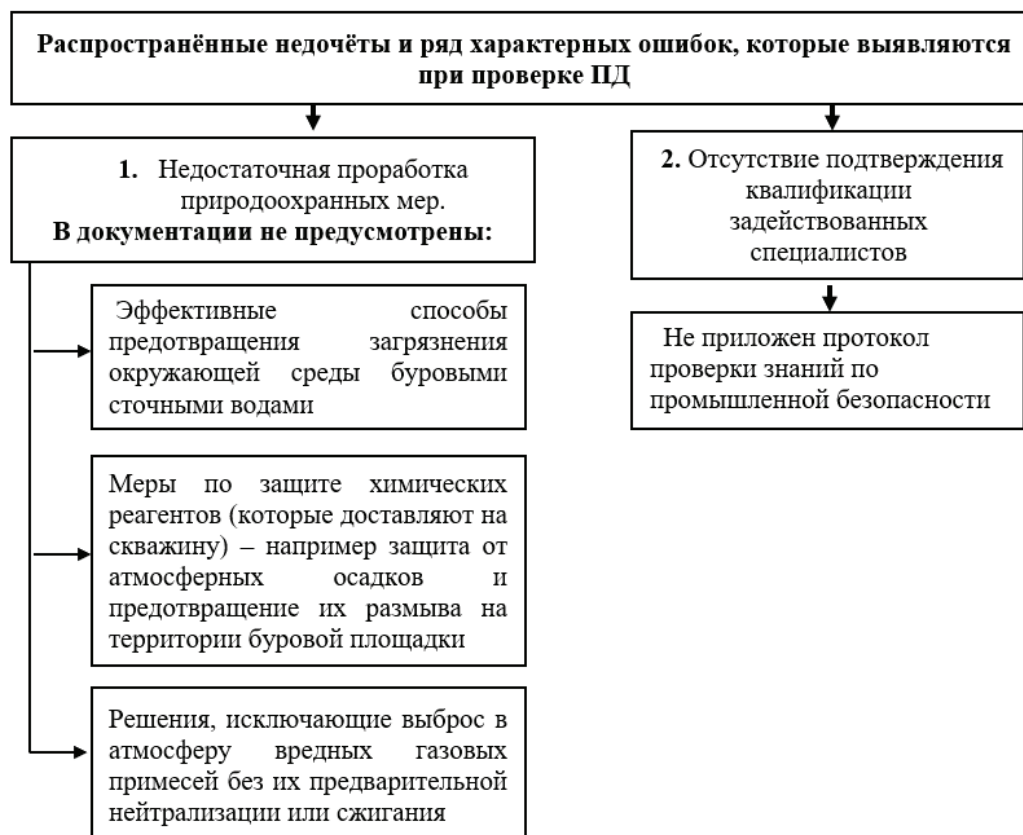


Рис. 4. Распространённые недочёты и ряд характерных ошибок, которые выявляются при проверке ПД при планировании консервации и ликвидации нефтегазовой отрасли

Большая часть выявленных замечаний напрямую связана с вопросами надёжности и безопасности объектов.

Это принципиально важно: от корректности проектных решений зависят жизнь и здоровье людей.

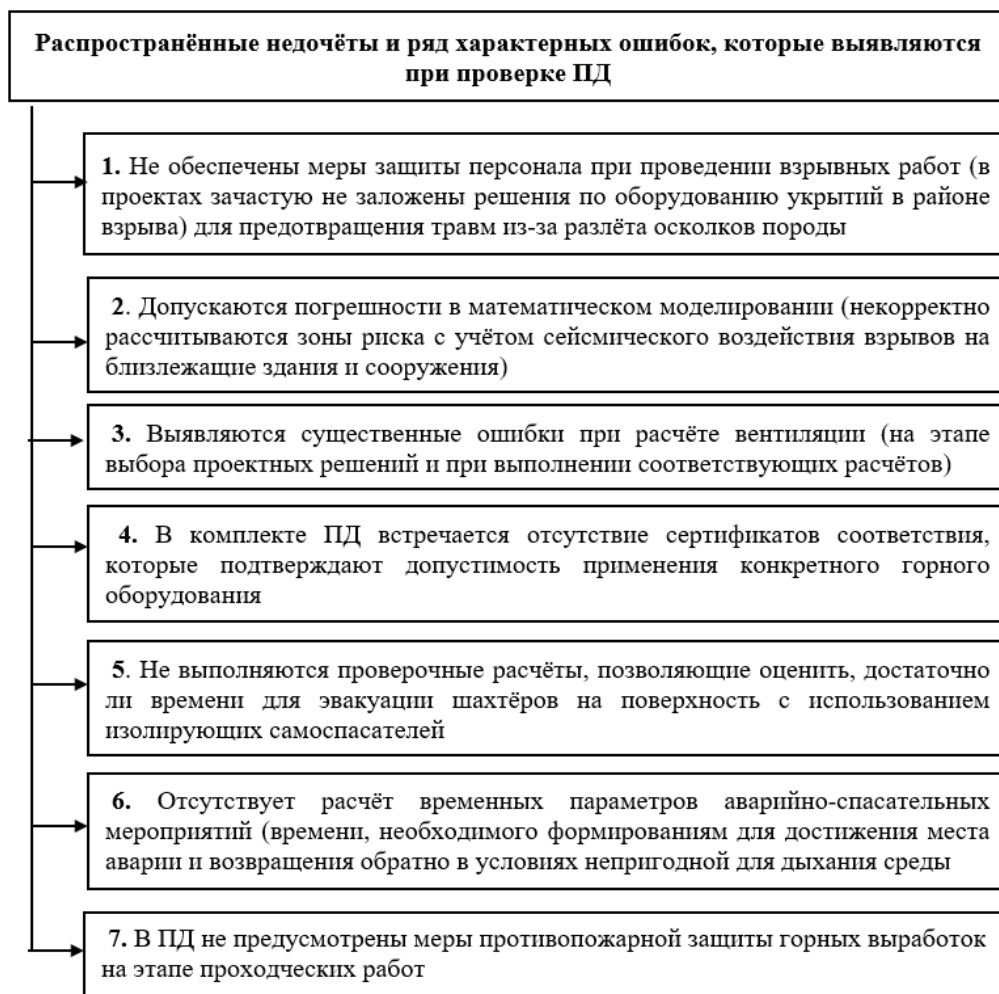


Рис. 5. Распространённые недочёты и ряд характерных ошибок, которые выявляются при проверке ПД при планировании консервации и ликвидации на объектах ведения горных работ

Литература:

1. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116 ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изм. и доп.). — М., 1997.
2. Федеральный закон от 27.12.2002 № 184 ФЗ «О техническом регулировании» (с изм. и доп.). — М., 2002.
3. Информационно-аналитический журнал «Рубеж»: ru-bezh.ru>infografika/ataki-bpla-iznos-
4. Чернякова М. А. Анализ аварийности на объектах нефтегазового комплекса России за период 2020–2024 гг.// Вестник магистратуры. 2025. № 6–1 (165). С. 6–7.
5. Коротков, Д. В., Кирьянов К. А., Диагностика строительных конструкций как неотъемлемая составляющая оценки технического состояния объекта // Молодой ученый. — 2024. — № 45 (544). — С. 39–44.
6. Сизов Д. И. Жидко Е. А. Анализ проектной документации как важный аргумент гарантии надежности и высокого уровня исполнения строительных работ // Молодой ученый. 2025. № 45 (596). С. 45–49.
7. Отчёт Ростехнадзора «Анализ состояния промышленной безопасности при эксплуатации опасных производственных объектов за 2023 год». — М.: Ростехнадзор, 2024.

АРХИТЕКТУРА, ДИЗАЙН И СТРОИТЕЛЬСТВО

Совершенствование технологических решений возведения малоэтажных зданий

Алексеев Роман Михайлович, студент магистратуры
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

В статье рассматривается эволюция и современное состояние конструктивных решений межэтажных перекрытий, применяемых в секторе малоэтажного жилищного строительства. Проведен детальный анализ традиционных технологий (балочных деревянных систем, монолитного и сборного железобетона), выявлены их ключевые достоинства и технологические ограничения. Особое внимание уделено инновационной технологии перекрестно-клееных деревянных панелей (CLT) как перспективной альтернативе традиционным материалам. На основе анализа нормативной базы и отечественного опыта определены основные барьеры и перспективы внедрения индустриальных деревянных конструкций в практику российского домостроения.

Ключевые слова: малоэтажное строительство, индивидуальное жилищное строительство (ИЖС), межэтажные перекрытия, монолитный железобетон, CLT-панели, индустриализация строительства.

Improving construction technologies for low-rise buildings

Alekseev Roman Mikhaylovich, master's student
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (St. Petersburg)

The article examines the evolution and current state of structural design solutions for interfloor ceilings applied in the low-rise housing construction sector. A detailed analysis of traditional technologies (timber beam systems, monolithic, and precast reinforced concrete) is carried out, identifying their key advantages and technological limitations. Special attention is paid to the innovative technology of cross-laminated timber (CLT) panels as a promising alternative to traditional materials. Based on the analysis of the regulatory framework and domestic experience, the main barriers and prospects for implementing industrial timber structures in the practice of Russian house-building are determined.

Keywords: low-rise construction, individual housing construction (IHC), interfloor ceilings, monolithic reinforced concrete, CLT panels, industrialization of construction.

Введение

Малоэтажное жилищное строительство в последние годы выступает ключевым драйвером строительной отрасли. Ввод в эксплуатацию объектов индивидуального жилищного строительства демонстрирует рекордные показатели. Этот рост стимулируется государственными программами поддержки, а также изменением потребительских предпочтений в пользу экологически чистого и автономного жилья.

Вместе с тем сектор малоэтажного строительства сталкивается с необходимостью оптимизации технологических процессов, снижения сроков возведения зданий и повышения их энергоэффективности. Одним из наиболее материалоемких и ответственных элементов здания являются межэтажные перекрытия, которые обеспечи-

вают не только восприятие эксплуатационных нагрузок, но и общую пространственную жесткость сооружения. Выбор конструктивного решения перекрытия определяет материалоемкость фундаментов, теплотехнический контур и общую продолжительность строительного цикла.

Исторически в малоэтажном строительстве доминировали деревянные балочные перекрытия из цельной древесины. Их популярность обуславливалась доступностью материала, отсутствием необходимости в тяжелой подъемной технике и простотой обработки. Однако со временем стали очевидны и недостатки таких конструкций: ограниченная несущая способность, чувствительность к влаге и недостаточная огнестойкость.

В двадцатом веке основным конструктивным решением постепенно стали железобетонные перекрытия —

сначала сборные, а затем и монолитные. Железобетон позволил увеличить пролеты и повысить пространственную жесткость зданий. Однако использование монолитных конструкций требует значительных трудовых затрат, устройства опалубки, проведения «мокрых» процессов и увеличения продолжительности строительного цикла.

Современный этап развития строительной индустрии характеризуется переходом к концепции устойчивого развития и глубокой индустриализации. Это обуславливает необходимость минимизации «мокрых» процессов на строительной площадке, перенесения основных технологических операций в заводские условия и снижения углеродного следа материалов. В связи с этим традиционные железобетонные и балочные деревянные системы требуют замены на современные инженерные строительные материалы.

Анализ традиционных конструктивных решений перекрытий

Деревянные балочные перекрытия

Традиционные балочные системы являются классическим решением для малоэтажного сектора и выполняются из цельного пиломатериала (досок, бруса) или конструкционного клееного бруса. Конструкция представляет собой сетку несущих балок, уложенных с определенным шагом, внутри которой размещаются слои гидро-, тепло- и звукоизоляции, закрытые сверху и снизу листовой или дощатой обшивкой.

Преимущества:

1. Минимальная собственная масса: удельный вес конструкции относительно мал. Это позволяет существенно снизить нагрузку на несущие стены и фундамент, открывая возможность использования облегченных типов оснований (например, мелкозаглубленных ленточных или свайно-ростверковых фундаментов).

2. Высокая технологичность монтажа: сборка элементов осуществляется силами небольшой бригады из нескольких человек. Процесс не требует привлечения тяжелой грузоподъемной техники или специализированных подъемных кранов, что минимизирует затраты на механизацию.

3. Низкая теплопроводность: природные свойства древесины обеспечивают высокие теплоизоляционные показатели элементов. Такое перекрытие само по себе не является проводником холода, что упрощает теплоизоляцию межэтажных зон.

Недостатки:

1. Ограничения по геометрическим параметрам: при больших пролетах резко возрастает требуемое сечение балок. Это приводит к неоправданному увеличению толщины перекрытия и перерасходу древесины.

2. Эффект зыбкости (батурности): деревянные балки обладают относительно низким модулем упругости. При динамических нагрузках (ходьба, прыжки) возникают

ощутимые вибрации и прогибы, что снижает общий акустический и эксплуатационный комфорт проживания.

3. Уязвимость к внешним факторам: древесина гигроскопична, поэтому чутко реагирует на температурно-влажностные колебания внутри помещений, что со временем вызывает деформации, усушку, коробление и появление скрипов.

4. Биологическая и огневая опасность: без регулярной и глубокой химической обработки специальными составами материал подвержен гниению, поражению грибом, насекомыми, а также имеет низкий предел огнестойкости (легко воспламеняется и поддерживает горение).

Железобетонные перекрытия (монолитные и сборные)

Железобетонные конструкции (как заливаемые непосредственно на объекте в опалубку, так и монтируемые из готовых заводских пустотных плит) остаются базовым решением для малоэтажных зданий со стенами из кирпича, крупных блоков или газобетона.

Преимущества:

1. Максимальная несущая способность: конструкции без труда выдерживают нормативные и сверхнормативные равномерно распределенные нагрузки. Это позволяет размещать на этажах тяжелую мебель, камины или инженерное оборудование без риска разрушения конструкции.

2. Абсолютная пространственная жесткость: перекрытия работают как монолитный диск жесткости, вызывая коробку здания в единую устойчивую систему. Они полностью исключают вибрации и прогибы.

3. Капитальность и долговечность: железобетон не подвержен биологическому разложению, не гниет, не требует эксплуатационного ухода и обладает огромным нормативным сроком службы.

4. Высокая изоляция воздушного шума: за счет высокой массивности и плотности материала бетон эффективно гасит звуковые волны, передающиеся по воздуху (голос, музыка, телевизор).

Недостатки:

1. Огромный собственный вес: масса конструкции крайне велика. Столь высокая постоянная нагрузка требует проектирования массивных несущих стен и усиленных, дорогостоящих фундаментов глубокого заложения.

2. Неудовлетворительные теплотехнические свойства: коэффициент теплопроводности железобетона крайне высок. В местах опирания на наружные стены неизбежно образуются масштабные «мостики холода». Они вызывают локальные теплопотери, промерзание углов и появление конденсата, что требует обязательного периметрального утепления.

3. Высокая трудоемкость и зависимость от погоды: устройство монолита включает в себя сложный цикл: монтаж опалубки, вязку арматурных сеток, прием бетона

и уход за ним. При этом «мокрые» процессы сильно ограничивают проведение работ в зимний период времени без дорогостоящего электропрогрева.

4. Растянутый строительный цикл: технологический перерыв, необходимый для набора бетоном проектной прочности (до снятия опалубки), составляет до четырех недель, что замораживает последующие отделочные и монтажные работы на объекте.

Сущность и преимущества технологии CLT

Перекрестно-клееная древесина (CLT — Cross-Laminated Timber) представляет собой массивные панели, состоящие из слоев пиломатериалов, уложенных перпендикулярно друг другу и склеенных под высоким давлением. Такая структура обеспечивает высокую пространственную жесткость и стабильность геометрических характеристик. Усадка материала в плоскости панели практически отсутствует благодаря взаимно перпендикулярному расположению слоев, которые компенсируют деформации друг друга.

Технология CLT сочетает в себе конструкционные достоинства железобетона и экологические свойства древесины:

1. Высокая пространственная жесткость: панели работают как плита в нескольких направлениях, позволяя эффективно перекрывать пролеты и воспринимать значительные нагрузки при относительно небольшой собственной массе.
2. Индустриальность: панели поставляются на площадку со стопроцентной заводской готовностью, включая выполненные на станках проемы для инженерных коммуникаций. Это позволяет существенно сократить продолжительность монтажных работ и минимизировать количество операций на стройплощадке.
3. Огнестойкость: вопреки стереотипам о горючести дерева, CLT-панели способны обеспечивать требуемый предел огнестойкости за счет образования защитного обугленного слоя. Внешний обгоревший слой замедляет про-

никновение пламени внутрь, сохраняя несущую способность внутреннего неразрушенного ядра конструкции.

Барьеры внедрения технологии

Несмотря на очевидные технологические и экологические преимущества, применение CLT-перекрытий в практике отечественного малоэтажного строительства имеет определенные ограничения.

Широкое внедрение технологии сдерживается несколькими ключевыми факторами:

1. Экономический барьер: прямая стоимость кубического метра CLT-панелей на этапе закупки строительных материалов остается более высокой по сравнению с традиционными железобетонными решениями.
2. Дефицит опыта: нехватка квалифицированных проектных и монтажных организаций, специализирующихся на расчете и сборке массивных деревянных конструкций.
3. Акустические проблемы: из-за относительно малой массы конструкции обладают меньшей способностью к гашению звуковых колебаний (особенно ударного шума). Это требует разработки и применения дополнительных конструктивных решений, таких как плавающие полы и специальные звукоизоляционные прокладки.

Заключение

Анализ конструктивно-технологических решений перекрытий показывает, что традиционные технологии постепенно достигают пределов своей эффективности в рамках современных требований к скорости и экологичности строительства. Технология CLT представляет собой перспективное направление, позволяющее перенести строительные процессы в заводские цеха,кратно сократить сроки возведения объектов и повысить теплотехнические характеристики зданий. Успешная интеграция CLT в малоэтажное строительство зависит от масштабирования производственной базы и оптимизации узловых конструктивных решений.

Литература:

1. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий.
2. СП 54.13330.2022. Здания жилые многоквартирные.
3. СП 55.13330.2016. Дома жилые одноквартирные.
4. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции.
5. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции.
6. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции.
7. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия.
8. СП 131.13330.2020. Строительная климатология.
9. СП 2.13130.2020. Обеспечение огнестойкости зданий.
10. Казаков Ю. В., Ворона-Сливинская Л. В., Тимошук О. В. «Технология возведения энергоэффективных малоэтажных жилых зданий» — СПбГАСУ, 2020.
11. Казаков, Ю. Н. Инновационные технологии возведения энергосберегающих зданий: учебное пособие для вузов / Ю. Н. Казаков, Д. Т. Курасова. — СПбГАСУ 2026.
12. Юдина А. Ф. Технология строительного производства в задачах и примерах. — СПб: СПбГАСУ, 2016.

13. Миронова С. И., Бызов В. Е., Данилов Е. В., Коваль П. С. Деревянные конструкции: учебное пособие. — СПб.: СПбГАСУ, 2015. — 97 с.
14. Каратеев Л. П., Миронова С. И. Конструкции из дерева и пластмасс. Расчёт и конструирование основных элементов зданий: учебное пособие. — СПб.: СПбГАСУ, 2017.

Технико-экономический и теплотехнический анализ эффективности применения CLT-панелей в перекрытиях малоэтажных зданий

Алексеев Роман Михайлович, студент магистратуры
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Статья посвящена сравнительному исследованию эффективности применения монолитных железобетонных перекрытий и плит из перекрестно-клееной древесины (CLT) в малоэтажном домостроении. В работе представлены аналитические расчеты сопротивления теплопередаче и интенсивности тепловых потоков для обоих вариантов. Проведена комплексная оценка технологических параметров: трудоемкости, состава механизации и продолжительности монтажных работ на условную единицу площади (100 м²). Приведен сравнительный экономический анализ прямых капитальных затрат, подтверждающий, что первоначальное удорожание материалов компенсируется технологическими и эксплуатационными преимуществами деревянных конструкций в рамках жизненного цикла здания.

Ключевые слова: CLT-панели, монолитный железобетон, теплотехнический расчет, энергоэффективность, сметная стоимость, трудоемкость.

Technical-economic and thermal analysis of the effectiveness of using clt panels in floors of low-rise buildings

Alekseev Roman Mikhaylovich, master's student
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (St. Petersburg)

The article is devoted to a comparative study of the effectiveness of using monolithic reinforced concrete floors and cross-laminated timber (CLT) panels in low-rise housing construction. The paper presents analytical calculations of thermal resistance and heat flux density for both structural options. A comprehensive assessment of technological parameters is carried out, including labor intensity, the scope of mechanization, and the duration of installation works per conditional unit area (100 m²). A comparative economic analysis of direct capital costs is provided, confirming that the initial increase in material costs is compensated by the technological and operational advantages of timber structures within the building's life cycle.

Keywords: CLT panels, monolithic reinforced concrete, thermal calculation, energy efficiency, estimated cost, labor intensity.

Введение

Повышение энергоэффективности ограждающих конструкций является одной из приоритетных научно-практических задач в строительной сфере. Доля теплопотерь через перекрытия, покрытия и стены малоэтажного здания может достигать существенных объемов от общего баланса здания, при этом на межэтажные и цокольные перекрытия приходится значительная часть энергии.

Традиционно применяемый в капитальном строительстве монолитный железобетон обладает высокими прочностными характеристиками, но накладывает серьезные ограничения на темпы строительства из-за наличия «мокрых» процессов, а также требует дополнительного утепления вследствие высокой теплопроводности. Внедрение панелей из перекрестно-клееной древесины (CLT) позиционируется как решение, способное одновременно снизить теплопотери здания и существенно ускорить его

возведение. Цель данной статьи — количественно оценить теплотехнические, технологические и экономические параметры указанных альтернативных решений.

Методология и исходные данные

Для проведения сравнительного анализа были приняты следующие условия:

1. Условная площадь перекрытия малоэтажного здания: 100 м².
2. Вариант 1 (традиционный): Монолитное железобетонное перекрытие толщиной 200 мм из бетона класса В25, армированное вручную двухслойной сеткой.
3. Вариант 2 (инновационный): Перекрытие из крупноразмерных CLT-панелей заводской готовности толщиной 120 мм.
4. Расчетный температурный перепад между помещениями/средой: 25 °С.

Теплотехнический анализ и оценка эффективности

Базовым критерием оценки теплозащитных свойств служит приведенное сопротивление теплопередаче (R , $\text{м}^2\text{К/Вт}$), которое рассчитывается как отношение толщины слоя материала к его коэффициенту теплопроводности:

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (1)$$

Где δ — толщина слоя, м.

λ — коэффициент теплопроводности материала ($\text{Вт/м} \cdot \text{К}$).

Железобетонное перекрытие:

Коэффициент теплопроводности железобетона составляет $\lambda_{\text{жб}} = 1,8 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$

Согласно формуле 1, термическое сопротивление железобетонного перекрытия будет равно:

$$R_{\text{жб}} = \frac{0,20}{1,8} \approx 0,11 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$$

СТЛ-перекрытие:

Благодаря пористой структуре древесины и отсутствию сквозных швов, теплопроводность панели составляет всего $\lambda_{\text{ctl}} = 0,13 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$

Согласно формуле 1, термическое сопротивление СТЛ-перекрытия будет равно:

$$R_{\text{ctl}} = \frac{0,12}{0,13} \approx 0,92 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$$

Плотность теплового потока (q , Вт/м^2), отражающая интенсивность потерь тепла, вычисляется по формуле:

$$q = \frac{\Delta T}{R}, \quad (2)$$

При условии, что расчетный температурный перепад между помещениями и окружающей средой составляет 25°C , тогда:

Для железобетонного перекрытия:

$$q_{\text{жб}} = \frac{25}{0,11} \approx 227 \text{ Вт/м}^2$$

Для СТЛ-перекрытия:

$$q_{\text{ctl}} = \frac{25}{0,92} \approx 27 \text{ Вт/м}^2$$

Исходя из расчетов видно, что конструкция из СТЛ-панелей без дополнительного утеплителя обладает сопротивлением теплопередаче в несколько раз выше, чем монолитный железобетон. Это существенно снижает интенсивность теплопотерь через плиту перекрытия, минимизирует влияние «мостиков холода» в узлах примыкания к стенам и позволяет уменьшить затраты на последующую теплоизоляцию и отопление здания.

Технологический анализ

Технологический процесс устройства перекрытий кардинально отличается по структуре операций и затратам ресурсов. При монолитном исполнении процессы монтажа инвентарной опалубки и ручного армирования составляют основную долю трудоемкости. Внедрение технологии СТЛ полностью исключает данные подготовительные стадии, сокращая совокупные трудозатраты более чем на половину. Малая масса деревянных панелей снижает нагрузку на несущие стены и фундамент, снижая общую материалоемкость здания.

Сравнительный технологический анализ приведен в таблице 1.

На основе данных сравнительного анализа можно утверждать, что применение крупноформатных СТЛ-панелей толщиной 120 мм вместо традиционного монолитного железобетона толщиной 200 мм обеспечивает существенное

Таблица 1. Сравнительный технологический анализ

Технологический показатель / Этап работ	Вариант 1: Монолитный железобетон (200 мм)	Вариант 2: СТЛ-панели (120 мм)
Основные процессы	Установка поддерживающей опалубки; Ручная вязка арматурных каркасов; Прием бетонной смеси бетононасосом; Уход за бетоном (набор прочности); Демонтаж инвентарной опалубки	Геодезическая разбивка осей; Разгрузка элементов автокраном с колес; Позиционирование и монтаж панелей; Фиксация на саморезы и анкера; Герметизация монтажных стыков
Удельная трудоемкость	0,99–1,8 чел.-ч/м ²	0,34–0,56 чел.-ч/м ²
Общие трудозатраты (на 100 м ²)	99–180 чел.-ч	34–56 чел.-ч
Срок активных работ	5–8 рабочих дней	1,5–2 рабочих дня
Технологическая пауза	До 28 суток (для набора полной прочности)	Отсутствует (последующие работы сразу)
«Мокрые» процессы	Присутствуют в полном объеме	Полностью отсутствуют
Сезонность монтажа	Сильная зависимость от отрицательных температур (требуется дорогостоящий прогрев)	Всесезонный монтаж при любых температурах
Собственная масса (нагрузка)	Высокая: 480–500 кг/м ²	Облегченная: 150–250 кг/м ²

сокращение сроков и трудоемкости строительства. Главное преимущество инновационной технологии заключается в кратных темпах возведения конструкции: срок активных работ сокращается с 5–8 дней до рекордных 1,5–2 рабочих дней, при этом полностью нивелируется необходимость соблюдения обязательной 28-суточной технологической паузы на набор прочности бетона, что позволяет незамедлительно переходить к последующим этапам. Полное исключение таких трудоемких операций, как установка поддерживающей опалубки, ручная вязка арматурных каркасов и прием смеси бетононасосом, обеспечивает снижение удельной трудоемкости с высоких показателей 0,99–1,8 чел.-ч/м² до низких значений 0,34–0,56 чел.-ч/м². В результате на условную площадь перекрытия в 100 м² общие трудозатраты снижаются со 99–180 чел.-ч до всего 34–56 чел.-ч, что оптимизирует использование человеческих ресурсов. Абсолютный отказ от «мокрых» процессов делает монтаж панелей, фиксируемых лишь на саморезы и анкеры с последующей герметизацией стыков, полностью

независимым от климатических условий, гарантируя всесезонность работ без затрат на дорогостоящий зимний прогрев смеси. Дополнительным конструктивным фактором выступает существенное снижение постоянной нагрузки на основание: собственная масса перекрытия уменьшается с 480–500 кг/м² до облегченных 150–250 кг/м², что разгружает вертикальные несущие элементы здания и открывает возможности для оптимизации параметров фундаментов малоэтажного объекта.

Экономический эффект

Прямой экономический анализ стоимости устройства перекрытия площадью 100 м² выполнен на основе сопоставления текущих затрат на закупку сырья, логистику, привлечение строительной техники и производство монтажных работ.

Сравнительный анализ с точки зрения экономического эффекта приведен в таблице 2.

Таблица 2. Экономическое сравнение

Показатель затрат	Вариант 1: Монолитный железобетон (200 мм)	Вариант 2: CLT-панели (120 мм)
Стоимость материалов	252 000 руб. (Товарный бетон В25–20 м ³ , арматура А500С — 2 т, фиксаторы, расходники, аренда щитовой опалубки)	880 000 руб. (Плиты CLT заводского раскроя — 100 м ² , конструкционные саморезы, усиленные анкеры, уплотнительные ленты)
Стоимость работ и техники	820 000 руб. (Монтаж опалубки, вязка каркасов, заливка смеси, аренда автобетононасоса, уход за бетоном, демонтаж)	280 000 руб. (Геодезическая разбивка, монтаж панелей бригадой, аренда автокрана для разгрузки и установки «с колес»)
Итого прямые затраты	1 072 000 руб.	1 160 000 руб.
Разница в стоимости	Базовый вариант	Дороже на 8,2 % (+88 000 руб.)

Сравнительный анализ бюджетов в текущих ценах показывает, что на этапе первоначальных инвестиций перекрытие из CLT-панелей обходится дороже традиционного монолитного железобетона всего на 8,2 % (разница составляет 88 000 руб.).

Такое резкое сближение итоговой стоимости решений обусловлено высокой долей ручного труда, удорожанием аренды оборудования и ростом стоимости арматуры и цемента на рынке монолитного домостроения. Дополнительное удорожание монолитных работ перекрывается высокой заводской готовностью CLT, при монтаже которого исключаются скрытые расходы. Незначительное первоначальное вложение в деревянные панели компенсируется за счет следующих факторов:

1. Экономия на механизации и оплате труда: кратное сокращение сроков нахождения рабочих и техники на площадке (до 1,5–2 дней).
2. Снижение материалоемкости фундаментов: уменьшение массы перекрытия в 2–3 раза позволяет закладывать облегченные проектные решения для фундаментных плит или ростверков.
3. Снижение затрат на отделку и утепление: ровная поверхность плит заводского качества исключает необ-

ходимость в масштабных штукатурных работах, а низкая теплопроводность древесины минимизирует эксплуатационные затраты на отопление жилого дома.

Заключение

Проведенный технико-экономический и теплотехнический анализ подтверждает высокую эффективность интеграции CLT-панелей в практику малоэтажного строительства, которая в текущих экономических условиях 2026 года подкрепляется сильными финансовыми аргументами. Несмотря на то, что на этапе первоначальных инвестиций смета перекрытия из CLT-панелей составляет 1 160 000 рублей, что превышает затраты на монолитный железобетонный аналог в 1 072 000 рублей, фактическое удорожание конструкции составляет всего 8,2 % или 88 000 рублей в абсолютном выражении. Такое минимальное расхождение бюджетов обусловлено резким ростом цен на товарный бетон, металлопрокат и ручной труд в секторе монолитного домостроения, что делает заводские деревянные панели экономически конкурентоспособными уже на стадии закупки. Первоначальное незначительное вложение в материалы полностью окупается в рамках строи-

тельного цикла за счет кратного технологического преимущества, выраженного в снижении затрат на оплату труда рабочих и сокращении сроков аренды строительной техники с 5–8 дней до 1,5–2 суток. Финансовый эффект усиливается за счет снижения собственной массы перекрытия со 480–500 кг/м² до облегченных 150–250 кг/м², что позво-

ляет оптимизировать параметры фундаментов и снизить их сметную стоимость, а выдающиеся теплотехнические свойства деревянных плит минимизируют эксплуатационные расходы на отопление малоэтажного здания и исключают необходимость проведения дорогостоящих периметральных штукатурных и отделочных работ.

Литература:

1. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий.
2. СП 54.13330.2022. Здания жилые многоквартирные.
3. СП 55.13330.2016. Дома жилые одноквартирные.
4. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции.
5. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции.
6. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции.
7. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия.
8. СП 131.13330.2020. Строительная климатология.
9. СП 2.13130.2020. Обеспечение огнестойкости зданий.
10. Казаков Ю. В., Ворона-Сливинская Л. В., Тимошук О. В. «Технология возведения энергоэффективных малоэтажных жилых зданий» — СПбГАСУ, 2020.
11. Казаков, Ю. Н. Инновационные технологии возведения энергосберегающих зданий: учебное пособие для вузов / Ю. Н. Казаков, Д. Т. Курасова. — СПбГАСУ 2026.
12. Юдина А. Ф. Технология строительного производства в задачах и примерах. — СПб: СПбГАСУ, 2016.
13. Миронова С. И., Бызов В. Е., Данилов Е. В., Коваль П. С. Деревянные конструкции: учебное пособие. — СПб.: СПбГАСУ, 2015. — 97 с.
14. Каратеев Л. П., Миронова С. И. Конструкции из дерева и пластмасс. Расчёт и конструирование основных элементов зданий: учебное пособие. — СПб.: СПбГАСУ, 2017.

Особенности реализации проектов строительства объектов комфорт-класса (на примере квартала «Федерация» в г. Екатеринбурге)

Демидова Валерия Сергеевна, студент

Уральский государственный экономический университет (г. Екатеринбург)

В статье рассматриваются особенности реализации проектов строительства объектов комфорт-класса в современных условиях развития рынка жилой недвижимости. Исследуются основные характеристики жилья комфорт-класса, факторы его конкурентоспособности, а также организационно-экономические аспекты управления строительными проектами. В качестве объекта исследования рассмотрен квартал «Федерация» в городе Екатеринбурге. Выявлены основные проблемы реализации проектов данного сегмента и предложены направления их совершенствования. В статье рассматриваются особенности реализации проектов строительства объектов комфорт-класса в современных условиях развития рынка жилой недвижимости. Исследуются основные характеристики жилья комфорт-класса, факторы его конкурентоспособности, а также организационно-экономические аспекты управления строительными проектами. В качестве объекта исследования рассмотрен квартал «Федерация» в городе Екатеринбурге. Выявлены основные проблемы реализации проектов данного сегмента и предложены направления их совершенствования.

Ключевые слова: комфорт-класс, жилая недвижимость, строительный проект, девелопмент, городская среда, квартал Федерация, Екатеринбург. комфорт-класс, жилая недвижимость, строительный проект, девелопмент, городская среда, квартал Федерация, Екатеринбург.

Сегмент жилья комфорт-класса занимает одно из ведущих мест на современном рынке недвижимости. Рост требований населения к качеству проживания, благоустройству территории и инфраструктурному обеспечению привел к существенному увеличению спроса на по-

добные объекты. В условиях высокой конкуренции между девелоперами особое значение приобретает создание проектов, способных обеспечить не только ввод нового жилья, но и формирование полноценной городской среды. Целью исследования является анализ особенно-

стей реализации проектов строительства объектов комфорт-класса на примере квартала «Федерация» в Екатеринбурге. Сегмент жилья комфорт-класса занимает одно из ведущих мест на современном рынке недвижимости. Рост требований населения к качеству проживания, благоустройству территории и инфраструктурному обеспечению привел к существенному увеличению спроса на подобные объекты. В условиях высокой конкуренции между девелоперами особое значение приобретает создание проектов, способных обеспечить не только ввод нового жилья, но и формирование полноценной городской среды. Целью исследования является анализ особенностей реализации проектов строительства объектов комфорт-класса на примере квартала «Федерация» в Екатеринбурге. [1, 2, 11]

Под объектами комфорт-класса [1, 2, 11] понимаются жилые комплексы, сочетающие доступность для широкого круга покупателей и повышенные потребительские характеристики. Ключевыми признаками данного сегмента являются улучшенные планировки квартир, качественные строительные материалы, современные инженерные системы, благоустроенные дворовые территории и развитая инфраструктура. В отличие от стандартного жилья комфорт-класс ориентирован на создание благоприятной среды проживания. Большое значение имеют безопасность территории, транспортная доступность, наличие образовательных и медицинских учреждений, а также архитектурная выразительность застройки. В современных условиях покупатели оценивают не только квартиру, но и качество окружающего пространства, что повышает требования к девелоперам [1, 2, 11]. Под объектами комфорт-класса понимаются жилые комплексы, сочетающие доступность для широкого круга покупателей и повышенные потребительские характеристики. Ключевыми признаками данного сегмента являются улучшенные планировки квартир, качественные строительные материалы, современные инженерные системы, благоустроенные дворовые территории и развитая инфраструктура. В отличие от стандартного жилья комфорт-класс ориентирован на создание благоприятной среды проживания. Большое значение имеют безопасность территории, транспортная доступность, наличие образовательных и медицинских учреждений, а также архитектурная выразительность застройки. В современных условиях покупатели оценивают не только квартиру, но и качество окружающего пространства, что повышает требования к девелоперам. [1, 2, 11]

Управление проектами строительства объектов комфорт-класса представляет собой сложный многоэтапный процесс. Он включает выбор земельного участка, подготовку проектной документации, получение разрешений, организацию финансирования, выполнение строительно-монтажных работ и ввод объекта в эксплуатацию. Существенное влияние оказывают требования градостроительного, земельного, жилищного и гражданского законодательства. В последние годы особую роль при-

обрел механизм проектного финансирования с использованием счетов эскроу. Данный инструмент повысил защищенность покупателей, но одновременно увеличил требования к финансовой устойчивости застройщиков. Эффективность управления проектом зависит от качества планирования, контроля сроков и минимизации рисков. Управление проектами строительства объектов комфорт-класса представляет собой сложный многоэтапный процесс. Он включает выбор земельного участка, подготовку проектной документации, получение разрешений, организацию финансирования, выполнение строительно-монтажных работ и ввод объекта в эксплуатацию. Существенное влияние оказывают требования градостроительного, земельного, жилищного и гражданского законодательства. В последние годы особую роль приобрел механизм проектного финансирования с использованием счетов эскроу. Данный инструмент повысил защищенность покупателей, но одновременно увеличил требования к финансовой устойчивости застройщиков. Эффективность управления проектом зависит от качества планирования, контроля сроков и минимизации рисков. [1, 2, 11]

Квартал «Федерация» является одним из заметных проектов комфорт-класса в Екатеринбурге. Комплекс расположен в районе улиц Степана Разина, Щорса и Чапаева, что обеспечивает высокую транспортную доступность и близость к центральной части города. Проект отличается масштабностью застройки, выразительной архитектурной концепцией и развитой инфраструктурой. В составе комплекса предусмотрены жилые секции различной этажности, подземный паркинг, общественные пространства, детские площадки и объекты социальной инфраструктуры. Особенностью проекта является ориентация на семейный формат проживания. Планировочные решения предусматривают просторные квартиры, кухни-гостиные, гардеробные помещения и современные общественные пространства. Квартал «Федерация» является одним из заметных проектов комфорт-класса в Екатеринбурге. Комплекс расположен в районе улиц Степана Разина, Щорса и Чапаева, что обеспечивает высокую транспортную доступность и близость к центральной части города. Проект отличается масштабностью застройки, выразительной архитектурной концепцией и развитой инфраструктурой. В составе комплекса предусмотрены жилые секции различной этажности, подземный паркинг, общественные пространства, детские площадки и объекты социальной инфраструктуры. Особенностью проекта является ориентация на семейный формат проживания. Планировочные решения предусматривают просторные квартиры, кухни-гостиные, гардеробные помещения и современные общественные пространства. [1, 2, 11]

Несмотря на устойчивый спрос, реализация проектов комфорт-класса сопровождается рядом трудностей. К основным проблемам относятся рост стоимости строительных материалов, увеличение затрат на привлечение

финансирования, дефицит квалифицированных кадров и нестабильность рыночной конъюнктуры. Существенное влияние оказывают изменения нормативно-правовой базы и повышение требований покупателей к качеству жилой среды. Для крупных проектов дополнительным фактором риска становится необходимость комплексного развития территории и создания инфраструктурных объектов. Все это требует от девелоперов применения современных методов управления и постоянного совершенствования строительных процессов. Несмотря на устойчивый спрос, реализация проектов комфорт-класса сопровождается рядом трудностей. К основным проблемам относятся рост стоимости строительных материалов, увеличение затрат на привлечение финансирования, дефицит квалифицированных кадров и нестабильность рыночной конъюнктуры. Существенное влияние оказывают изменения нормативно-правовой базы и повышение требований покупателей к качеству жилой среды. Для крупных проектов дополнительным фактором риска становится необходимость комплексного развития территории и создания инфраструктурных объектов. Все это требует от девелоперов применения современных методов управления и постоянного совершенствования строительных процессов. [1, 2, 11]

Для повышения эффективности реализации проектов комфорт-класса целесообразно расширять использование цифровых технологий проектирования и управления строительством. Применение BIM-моделирования позволяет повысить качество проектных решений и сократить количество ошибок на этапе строительства. Важным направлением является развитие энергоэффективных технологий и внедрение современных инженерных систем. Особое внимание необходимо уделять благоустройству территорий, созданию общественных пространств и повышению уровня безопасности. Конкурентоспособность современных проектов во многом определяется качеством городской среды, формируемой вокруг жилого комплекса. Для повышения эффективности реализации проектов

комфорт-класса целесообразно расширять использование цифровых технологий проектирования и управления строительством. Применение BIM-моделирования позволяет повысить качество проектных решений и сократить количество ошибок на этапе строительства. Важным направлением является развитие энергоэффективных технологий и внедрение современных инженерных систем. Особое внимание необходимо уделять благоустройству территорий, созданию общественных пространств и повышению уровня безопасности. Конкурентоспособность современных проектов во многом определяется качеством городской среды, формируемой вокруг жилого комплекса. [1, 2, 11]

Проведенное исследование показало, что объекты комфорт-класса являются одним из наиболее перспективных сегментов рынка жилой недвижимости. Их востребованность обусловлена сочетанием доступной стоимости и высокого качества среды проживания. Анализ квартала «Федерация» подтвердил, что успешная реализация подобных проектов требует комплексного подхода, включающего эффективное управление, качественное проектирование, развитую инфраструктуру и ориентацию на потребности жителей. В перспективе значение проектов комфорт-класса будет возрастать, поскольку именно они обеспечивают формирование современной и комфортной городской среды. Проведенное исследование показало, что объекты комфорт-класса являются одним из наиболее перспективных сегментов рынка жилой недвижимости. Их востребованность обусловлена сочетанием доступной стоимости и высокого качества среды проживания. Анализ квартала «Федерация» подтвердил, что успешная реализация подобных проектов требует комплексного подхода, включающего эффективное управление, качественное проектирование, развитую инфраструктуру и ориентацию на потребности жителей. В перспективе значение проектов комфорт-класса будет возрастать, поскольку именно они обеспечивают формирование современной и комфортной городской среды. [1, 2, 11]

Литература:

1. Горемыкин, В. А. Экономика недвижимости: учебник / В. А. Горемыкин. — Москва: Райт, 2022. — 512 с. — Текст: непосредственный.
2. Altamira, A. A Comprehensive Review of the Factors and Strategies to Mitigate Construction Projects Delays in Saudi Arabia / A. Altamira, F. Ghazali // Open Construction & Building Technology Journal. — 2024. — Vol. 18. — Article e18748368318470. — DOI: 10.2174/0118748368318470240806113627. — URL: <http://dx.doi.org/10.2174/0118748368318470240806113627> (дата обращения: 03.05.2026). — Текст: электронный.
3. Градостроительный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 29.12.2004 № 190-ФЗ: ред. от 23.03.2026. — Текст: электронный. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/ (дата обращения: 03.05.2026).
4. Земельный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 25.10.2001 № 136-ФЗ: ред. от 30.01.2026, с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2026. — Текст: электронный. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/ (дата обращения: 03.05.2026).
5. Жилищный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 29.12.2004 № 188-ФЗ: ред. от 20.02.2026. — Текст: электронный. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51057/ (дата обращения: 03.05.2026).

6. Об участии в долевом строительстве многоквартирных домов и иных объектов недвижимости и о внесении изменений в некоторые законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 30.12.2004 № 214-ФЗ: последняя редакция. — Текст: электронный. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51038/ (дата обращения: 03.05.2026).
7. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ: последняя редакция. — Текст: электронный. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (дата обращения: 03.05.2026).
8. Объектив.РФ: информационно-аналитический сервис рынка недвижимости. — Текст: электронный. — URL: <https://xn--90acimjv5a2d.xn--p1ai/> (дата обращения: 03.05.2026).
10. Савельева Е. А. Управление инвестиционно-строительными проектами.
9. Квартал «Федерация»: официальный сайт проекта. — Текст: электронный. — URL: <https://prospect-federation.ru/> (дата обращения: 03.05.2026).
10. Анализ рынка недвижимости Екатеринбурга, февраль 2026 // Дом Недвижимости: аналитика рынка недвижимости. — Текст: электронный. — URL: https://www.domnedv.ru/analitika_rinka_nedvizhimosti/analiz-ryinka-nedvijimosti-ekaterinburga-fevral-2026_2026-02-02/ (дата обращения: 03.05.2026).
11. Профессиональная система аналитики рынка новостроек коммерческой и жилой недвижимости bnMAP.pro. — Текст: электронный. — URL: <https://bnmap.pro/> (дата обращения: 03.05.2026).

Сравнительный анализ результатов расчетного моделирования предварительного напряжения элементов стальной фермы с параллельным направлением поясов

Колмагорцев Илья Сергеевич, студент магистратуры

Научный руководитель: Цимбельман Никита Яковлевич, доктор технических наук, доцент

Дальневосточный федеральный университет (г. Владивосток)

Ключевые слова: предварительное напряжение, ферма с параллельными поясами, линейный расчет, нелинейный расчет, напряженно-деформированное состояние.

Введение

В современном строительстве для возведения большепролетных сооружений применение стальных ферменных конструкций с предварительным напряжением элементов или с системами управления напряженно-деформированным состоянием (НДС), позволит существенно снизить массу несущего каркаса и улучшить НДС системы, уменьшить материалоемкость и создать более безопасные конструкции при действии эксплуатационных и экстремальных нагрузок. Особый интерес представляют фермы с параллельным направлением поясов, в которых применение предварительного напряжения элементов или системы управления НДС могут эффективно перераспределять усилия в элементах фермы и уменьшать прогибы.

Данная статья посвящена сравнительному анализу результатов расчетного моделирования фермы с параллельным направлением поясов. Показано влияние способов задания предварительного напряжения на прогиб фермы, а также определены различия между расчетами с учетом геометрической нелинейности и стандартными линейными моделями. На практике расчет подобных систем чаще всего выполняется в линейной постановке задачи, такой подход закреплен в большинстве нормативных документах и программных комплексов, что свидетельствует о его доминировании в области проектирования сооружений.

1. Объект и методы исследования

1.1 Конструктивная схема фермы

Исследуемая конструкция, представляет собой плоскую шарнирно-стержневую систему, состоящую из верхнего и нижнего поясов, которые соединены между собой системной решеткой из наклонных восходящих и нисходящих раскосов. Пояса выполнены параллельно друг другу на протяжении всего пролета, что обеспечивает простую геометрию конструкции и равную длину элементов решетки, что способствует использованию одного типа соединений во всех узлах и большого числа одинаковых деталей. Данные решения способствуют унификации производства и упрощению реализации конструкции [8].

Параметры фермы:

- Пролет — 14 м;
- Высота — 2 м;
- Решетка — раскосная;
- Сечение поясов — двутавр;
- Сечение раскосов — двутавр;
- Материал — сталь С245.

Важно отметить, использование двутавров в конструкции фермы. При предварительном напряжении нижний пояс фермы испытывает значительные растягивающие, а иногда внецентренно-сжимающие усилия. Двутавр обладает значительным моментом сопротивления и рациональным распределением материала по сечению, что позволяет эффективно воспринимать усилия [5]. При воздействии на нижний пояс фермы предварительного напряжения или системы управления НДС, пояс начинает работать на сжатие, следовательно, должен сохранять устойчивость, сечение двутавра имеет благоприятную форму для обеспечения устойчивости пояса в плоскости фермы за счет развитых полок и относительной высоты стенки [6].

Пояса разбиты на панели одинаковой длины, в узлы верхнего пояса приложены узловые нагрузки (от покрытия, снега и собственного веса). В каждой панели решетка образована парой наклонных элементов: восходящие раскосы и нисходящие раскосы. В такой конструкции верхний пояс и восходящие раскосы работают преимущественно на сжатие, а нижний пояс и нисходящие раскосы на растяжение [7].

Использование двутавров в данной конструкции обусловлено тем, что в таком сечении распределение материала лучше соответствует распределению нормальных напряжений от изгиба элемента [1]. Это позволяет максимально эффективно использовать прочность металла при изгибе и воспринимать значительные поперечные силы в узлах соединения элементов.

Фактическое соединение элементов фермы является жестким, в таких случаях присутствуют изгибающие моменты, но они являются незначительными, что позволяет использовать шарнирную схему. При расчете плоских ферм применяются определенные допущения, позволяющие упростить расчет [4]:

- Стержни невесомы. Вес стержней пренебрежимо мал по сравнению с внешними нагрузками, которые прикладываются к ферме.
- Стержни соединены шарнирами. Узлы фермы считаются идеальными шарнирами без трения.
- Все внешние силы приложены к узлам фермы. Силы, которые приложены вне узлов, распределяются по соответствующим узлам. Это позволяет считать, что стержни работают только на растяжение или сжатие, так как силы, действующие на концы стержня, направлены вдоль его оси.

Для обеспечения предварительного напряжения параллельно нижнему поясу фермы запроектирован стержневой элемент, присоединенный к пластинам, приваренным к самому поясу. Элементы длиной 20 см распложены перпендикулярно двутавру на расстоянии 2 м от опорных узлов с каждой стороны. В узлах соединения пластин и нижнего пояса фермы заданы абсолютно жесткие тела (АЖТ), чтобы исключить деформации элементов для упрощения расчета.

Расчетная схема фермы показана на рисунке 1.

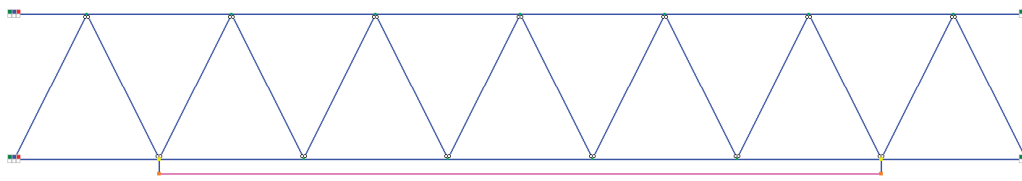


Рис. 1. Расчетная схема

1.2 Методы исследования

Расчет фермы произведен при помощи ПК «ЛИРА-САПР 2021» методом конечных элементов.

При расчете ферма была нагружена до предельных значений несущей способности отдельных элементов. Величина нагрузки составила 6,76 т на 2 м пролета фермы.

1.2.1 Линейный расчет

Это метод определения НДС конструкции с использованием линейных зависимостей между внешними воздействиями, внутренними силами, перемещениями и деформациями [2]. При данном подходе применяются упрощающие допущения, которые позволяют упрощать расчеты, но результаты являются менее точными.

Эффект предварительного напряжения стержневого элемента обеспечен за счет температурного расширения сжатия стали. Значение равномерного охлаждения вдоль местной оси X равно $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.2.2 Нелинейный расчет

Это расчет несущих конструкций с учетом нелинейной зависимости между нагрузками и вызываемыми напряжениями, деформациями и перемещениями. При расчете учитываются упруго-пластические (нелинейные) характеристики конструкций, что позволяет более реально оценить распределение усилий в отдельных сечениях [9].

Стержневому элементу, расположенному параллельно нижнему поясу фермы, задана жесткость 208 конечный элемент (КЭ). Это характеристика физически нелинейного двухузлового КЭ предварительного натяжения, такой КЭ предназначен для моделирования работы натяжного устройства [3].

К стержневому элементу задана продольная нагрузка, которая направлена к центру пролета фермы и равная значению усилия от температурного сжатия из линейного расчета 13,3 т.

Расчет выполнен пошаговым методом.

2. Анализ результатов

2.1 Результаты линейный расчет

По результатам расчета продольное усилие в элементе равно 13,3 т и показано на рисунке 2.

РСН(СП 20.13330.2011/2016, 1)
Элемент N
Единица измерения - т



Рис. 2. Эпюра N, т

Максимальное перемещение узлов по оси Z составило 7,23 мм. Мозаика перемещений показаны на рисунке 3.

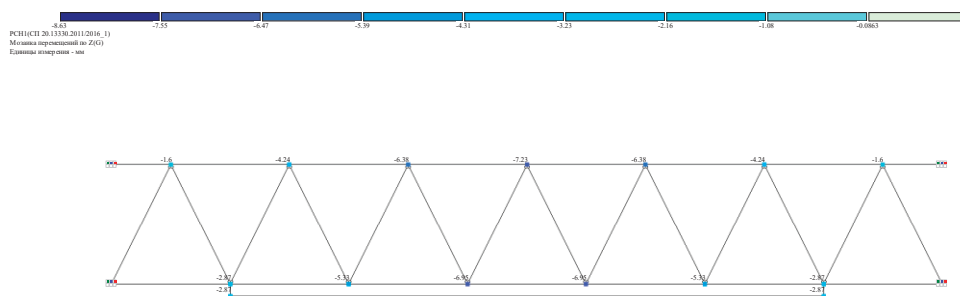


Рис. 3. Мозаика перемещений на оси Z, мм

На рисунке 4 показаны значения продольных усилий в ферме.

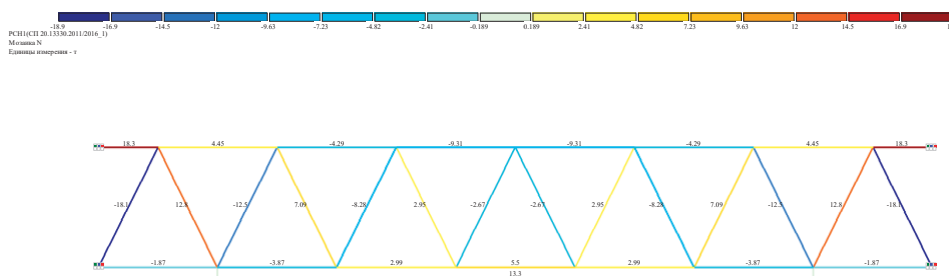


Рис. 4. Мозаика N, т

2.2 Результаты нелинейного расчета

По результатам расчета максимальное перемещение узлов по оси Z составило 10,9 мм. Мозаика перемещений показана на рисунке 6.

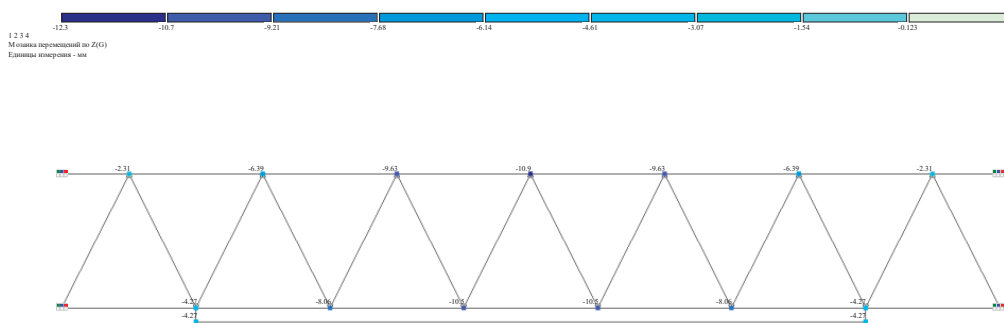


Рис. 6. Мозаика перемещений на оси Z, мм

На рисунке 7 показаны значения продольных усилий в ферме.

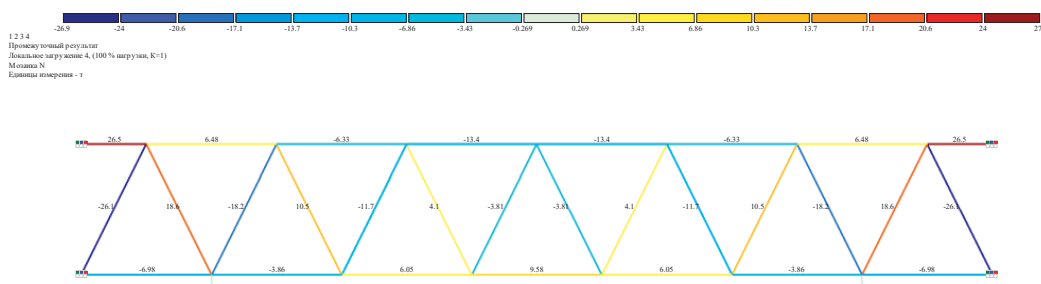


Рис. 7. Мозаика N, т

Вывод

По результатам двух методов расчета и соответственно подходов к моделированию предварительного напряжения в элементе фермы установлено, что при создании одинакового расчетного усилия в преднапряженном элементе, значения максимального прогиба существенно различаются:

- линейный расчет (температурное сжатие стали) — 7,23 мм;
- нелинейный расчет (предварительное напряжение элемента) — 10,9 мм.

Температурное сжатие стали оказалось эффективнее, чем преднапряжение элемента, оно обеспечивает на 3,67 мм (или на 33,67 %) меньший конечный прогиб при том же самом создаваемом усилии. Также значения продольных усилий во всех элементах фермы по результатам линейного расчета оказались значительно ниже, чем при нелинейном расчете. Необходимо отметить, что меньшие усилия при линейном расчете свидетельствуют о том, что линейная модель не учитывает дополнительные усилия, возникающие в реальной конструкции из-за её деформации под нагрузкой.

Литература:

1. Вычиков, А. В. Обоснование эффективности расположения усиливающих элементов при усилении прокатных балок с расположением плит на верхнем поясе: специальность 08.04.01 «Строительство»: Диссертация на соискание доктора технических наук / Вычиков, А. В.; Тольяттинский государственный университет. — Тольятти, 2021. — 107 с.
2. Досько, В. А., Сидорович, Е. М. Расчет сооружений по деформированной схеме [Текст] / В. А. Досько, Е. М. Сидорович // Белорусский национальный технический университет. — 2016. — №. — С. 76–81.
3. ЛИРА-САПР 2021: Справочная информация — 2021.

4. Лекция 10. Расчет плоских ферм / [Электронный ресурс] // Центр дистанционного образования и цифровых компетенций МГУ им. Н. П. Огарёва: [сайт]. — URL: https://openedo.mrsu.ru/catalog/Estestvennie/2014/siromiasov_geometr_stat/Text/Lection10.htm (дата обращения: 26.04.2026).
5. Стальные конструкции зданий и сооружений: учебное пособие. Часть 3 / ННГАСУ — Нижний Новгород: ННГАСУ, 2021.
6. Фермы, предварительно напряженные затяжками / [Электронный ресурс] // StudFiles: [сайт]. — URL: <https://studfile.net/preview/9933486/page:8/> (дата обращения: 26.04.2026).
7. Расчет фермы / Артамонова Е. Н., Зайцева И. М. [Электронный ресурс] // StudFiles: [сайт]. — URL: <https://studfile.net/preview/3829771/page:3/> (дата обращения: 26.04.2026).
8. Фермы металлические стальные с параллельными поясами — надёжность прямолинейной геометрии / [Электронный ресурс] // SSA.RU: [сайт]. — URL: <https://ssa.ru/articles/fermy-metallicheskie-stalnye-s-parallelnymi-pojasami-nadyozhnost-prjamolineinoi-geometrii.html> (дата обращения: 26.04.2026).
9. Фермы. Расчет сооружений по деформированной схеме [Электронный ресурс]: страница 3 // Studfiles. — URL: <https://studfile.net/preview/4293090/page:3/> (дата обращения: 26.04.2026).

Эмоционально-художественное моделирование архитектурно-градостроительного облика малых и средних городов: методология и три подхода

Ларионова Елизавета Николаевна, студент магистратуры
Южный федеральный университет (г. Ростов-на-Дону)

В статье представлена методология эмоционально-художественного моделирования архитектурно-градостроительного облика (АГО) малых и средних городов. Актуальность обусловлена противоречием между формальным нормативным регулированием и потребностью населения в психологически комфортной, идентичной среде. Предложены три метода — исторический, концептуальный, гибридный — с целевыми эмоциями и приёмами. Разработана матрица выбора метода для четырёх типовых зон: историческое ядро (зона концентрации объектов культурного наследия и зданий градостроительной ценности), зона индивидуальной жилой застройки, зона современной типовой застройки (здания по типовым проектам, включая постройки 1990–2000х гг. с примитивной архитектурой), рекреационные зоны (пространства для прогулок, событий, игр, буферные зоны, потенциальные территории для благоустройства). Апробация на примере г. Каменск-Шахтинский подтвердила эффективность исторического метода на уровне фасада.

Ключевые слова: архитектурно-градостроительный облик, эмоционально-художественное моделирование, исторический метод, концептуальный метод, гибридный метод, малые и средние города, локальная идентичность.

На современном этапе градостроительного развития Российской Федерации всё более очевидным становится противоречие между формально-нормативным регулированием архитектурно-градостроительного облика (АГО) и объективной потребностью населения в психологически комфортной, художественно выразительной городской среде, учитывающей локальную идентичность. Постановление Правительства РФ от 29 мая 2023 г. № 857 «Об утверждении требований к архитектурно-градостроительному облику объектов капитального строительства» устанавливает обязательные требования к объёмно-пространственным, стилистическим, колористическим и материальным решениям фасадов, размещению инженерного оборудования и архитектурной подсветке. Однако данный документ ориентирован преимущественно на формальную гармонию и визуальную дисциплину, практически не регламентируя эмоционально-художественную составляющую — способность городской среды

вызывать устойчивые положительные переживания, формировать локальную идентичность и психологическую привязанность к месту [1].

Для малых и средних городов, где численность населения и ресурсная база не позволяют реализовывать масштабные проекты, проблема усугубляется массовым тиражированием типовых проектов, разрушением исторического контекста, визуальным шумом и сенсорной депривацией. В этих условиях особую значимость приобретают точечные, контекстно-чувствительные художественные вмешательства, основанные на глубоком понимании механизмов эмоционального восприятия среды. Однако существующая градостроительная практика не располагает системным инструментарием, позволяющим обоснованно выбирать между различными подходами к формированию облика — опорой на историческое наследие, созданием принципиально новой концепции или их гибридизацией.

Теоретические основы эмоционально-художественного моделирования

Ретроспективный анализ мирового и отечественного опыта формирования архитектурно-градостроительного облика городов позволяет выделить устойчивые инвариантные закономерности, которые в настоящем исследовании названы «законами эмоционально-художественного формообразования» [2; 3]. К ним относятся: закон тектонической правды (античность), закон эмоционального контраста (средневековье), закон художественной перспективы (ренессанс — барокко), закон эстетики регламента (классицизм — ампир), закон органической линии (модерн), закон атектоники (авангард), закон семантики формы (постмодернизм), закон цифровой пластики (параметризм), а также специфические отечественные закономерности: живописный силуэт (московское царство), эмоциональная кульминация (сталинский ампир) и семантический коллаж (постсовременность). Каждый из этих законов устанавливает устойчивую связь между формально-пространственными характеристиками среды и целевым эмоциональным состоянием.

Современные методы оценки эмоционального восприятия включают эмоциональное картирование, анализ социальных сетей с применением методов, эмпатические опросы для уязвимых групп, биометрическое картирование и нейрофизиологические методы [4; 5]. В результате обобщения зарубежных экспериментальных исследований установлены количественные целевые коридоры, обеспечивающие устойчивый положительный эмоциональный отклик: доля зелени в кадре — 25–40 %; визуальная сложность фасадов — 4–5 баллов по пятибалльной шкале; плотность застройки ≤ 40 %; цветовая энтропия — умеренная (не более 5–7 цветов на фасаде) [6].

Зарубежная практика демонстрирует эффективность формо-ориентированных и партисипаторных подходов. FormBased Codes (FBC), применяемые в США, Канаде, Австралии и Великобритании, регулируют форму застройки: высоту зданий, отступы, процент остекления первого этажа, материалы фасадов. В городе Петоска (штат Мичиган, США) внедрение FBC привело к снижению вакантности коммерческих помещений с 28 % до 12 %, росту пешеходного трафика на 34 % и повышению удовлетворённости жителей архитектурным обликом с 2,7 до 4,2 баллов [7].

Методология эмоционально-художественного моделирования

Разработанная методология базируется на синтезе функционально-типологического (профессионального) и контекстуального (основанного на коллективных представлениях горожан) анализов. Функционально-типологический анализ включает типологию города по десяти признакам (расселение, численность, функции, конфигурация, правовой статус, историческая ценность, проис-

хождение, доступность, географическое положение, национальный состав), а также детальное исследование городской структуры: транспортно-пешеходный каркас, функциональное зонирование, морфологию застройки, цветовой ареал и материалы, объекты культурного наследия (ОКН), туристические маршруты, ландшафтные характеристики [8]. Контекстуальный анализ, в свою очередь, выявляет коллективные, часто неосознанные представления горожан о своей территории через опросы, эмоциональное картирование, анализ социальных сетей и глубинные интервью.

Три метода эмоционально-художественного моделирования

Исторический метод ориентирован на сохранение, воссоздание и актуализацию культурного наследия, локальной идентичности и исторической преемственности. Целевые эмоции: гордость, ностальгия, безопасность, благоговение, уют. Ключевые приёмы: морфологическая реставрация (восстановление линии застройки, высотного регламента, ритма фасадов); колористическая археология (реконструкция аутентичной цветовой палитры); орнаментальная цитата (воспроизведение локальных декоративных мотивов); исторический сторителлинг (нарративные пешеходные маршруты); тёплая статичная подсветка (2700–3000 К) с акцентом на архитектурные детали.

Концептуальный метод ориентирован на создание новых образов, сценариев и пространственных переживаний, опираясь на «большую идею» (экологическую, технологическую, культурную). Целевые эмоции: удивление, вовлечённость, свобода, оптимизм. Ключевые приёмы: архитектура-аттракцион (бионические формы, параметрические фасады); медиа-фасады и интерактивные поверхности (RGB-подсветка, AR-приложения); тактический урбанизм (временные инсталляции, модульные уличные элементы); суперграфика и муралы; вертикальное озеленение и эко-каркас.

Гибридный метод синтезирует приёмы исторического и концептуального подходов, создавая многослойную среду. Целевые эмоции: гармония, гордость, интерес, принятие, защищённость. Ключевые приёмы: контекстные инъекции (современные вставки в исторической ткани); адаптивное наследие (новое функциональное наполнение ОКН); рекомбинантная эстетика (сочетание исторических орнаментов с современными материалами); гибридный свет и навигация; сценарно-событийное зонирование [9].

Матрица выбора метода и типовые зоны города

Для систематизации выбора метода в зависимости от типа городской территории разработана матрица выбора метода эмоционально-художественного моделирования. В малых и средних городах выделены четыре типовые зоны, каждая из которых обладает специфическими морфологическими и перцептивными характеристиками:

1. Историческое ядро — зона концентрации объектов культурного наследия (ОКН), а также зданий, представляющих градостроительную ценность, но не имеющих официального статуса ОКН. Данная зона формирует уникальный образ города, обладает ценной планировкой, масштабом, силуэтом и декоративными элементами фасадов.

2. Зона индивидуальной жилой застройки (ИЖС) — зона частных домовладений (усадебная, коттеджная застройка), которая зачастую охватывает значительные территории, в том числе в центральных районах города. Характеризуется малоэтажностью, высокой степенью приватности, разнородностью архитектурных решений.

3. Зона современной типовой застройки — здания, возведённые по типовым проектам (панельные, блочные, кирпичные серии 1960–1980х гг., а также постройки 1990х — 2000х гг., отличающиеся примитивной архитектурой, отсутствием декора и выполнением сугубо утилитарной функции без художественных излишеств на фасаде). Данная зона характеризуется монотонностью, низкой визуальной сложностью, высокой плотностью застройки.

4. Рекреационные зоны — пространства, предназначенные для прогулок, отдыха, проведения событийных мероприятий, игр, а также буферные зоны между различными функциональными территориями. Сюда относятся существующие парки, скверы, бульвары, пешеходные зелёные улицы, а также потенциальные территории, которые могут быть благоустроены под новые общественные пространства.

Для каждой из указанных зон в матрице определены предпочтительные методы (исторический, концептуальный или гибридный), целевые эмоции, проектные приёмы и параметры (цвет, материалы, оборудование, остекление, подсветка, орнамент, маршруты, художественные элементы) на уровнях «район — улица — фасад». Матрица служит инструментом поддержки принятия решений при разработке дизайн-кодов, мастер-планов и проектов благоустройства.

Апробация исторического метода (на примере г. Каменск-Шахтинский)

Апробация разработанной методики проведена на территории исторического ядра г. Каменск-Шахтинский Ро-

стовской области (проспект Карла Маркса). Предпроектный анализ выявил визуальные дефициты: высокая цветовая энтропия (более 15 цветов), хаотичная реклама (более 25 конструкций), разрозненные балконы (78 балконов, окрашенных в 23 цвета), инородная облицовка первых этажей, отсутствие подсветки. Контекстуальный анализ (опрос 90 респондентов, эмоциональное картирование 154 жителей) показал, что 20 % респондентов испытывают раздражение; наиболее востребован гибридный подход (45–50 %); цветовые предпочтения — тёплые природные тона [10].

Для двух зданий градостроительной ценности (№ 66 и № 68 по проспекту Карла Маркса) применён исторический метод на уровне фасада. Разработаны мероприятия: очистка фасадов от визуального шума; колористическая археология (замена жёлто-горчичного цвета на палитру «слоновая кость» (RAL 1014) с акцентами RAL 9010, 8015, 6005); восстановление архитектурных элементов (карнизов, пилястр, рустовки, балконных ограждений); упорядочение вывесок (отдельные буквы на первом этаже, остекление витрин ≥ 70 %); маскировка инженерного оборудования; устройство тёплой статичной подсветки (2700–3000 К).

Реализация мероприятий обеспечила снижение цветовой энтропии с 15 до 5–7 цветов, повышение визуальной сложности с 2–3 до 4–5 деталей на 100 м², устранение визуального шума, создание образцового фрагмента исторической среды.

Заключение

Разработанная методология позволяет перейти от формального соблюдения нормативных требований к осознанному проектированию эмоционального содержания городской среды. Предложенные методы могут использоваться при разработке дизайн-кодов, внесении изменений в Правила землепользования и застройки, составлении технических заданий и подготовке заявок на Всероссийский конкурс лучших проектов создания комфортной городской среды в малых городах (Постановление Правительства РФ № 237 от 7 марта 2018 г.). Дальнейшие исследования предполагают масштабирование предложенных решений и адаптацию гибридного и концептуального методов для других зон города.

Литература:

1. Постановление Правительства РФ от 29 мая 2023 г. № 857 «Об утверждении требований к архитектурно-градостроительному облику объектов капитального строительства». — М., 2023. — 12 с.
2. Базарина Е. К., Степанова Т. А. Численный анализ визуальной сложности архитектурной среды как фактора психологического комфорта городских пространств // Вестник КГПУ им. В. П. Астафьева. — 2026. — № 2. — С. 45–53.
3. Крашенинников А. В. Эмоциональное картирование в градостроительстве // Градостроительство. — 2021. — № 3. — С. 45–53.
4. Pučėnė E., et al. Emotional mapping of Kaunas city using social media sentiment analysis // Land (MDPI). — 2025. — Vol. 14, No. 2. — P. 312.

5. Schmidt S., et al. Biometric emotional mapping for accessible urban design // Lecture Notes in Computer Science. — 2024. — Vol. 14487. — P. 201–215.
6. Goldhagen S. W. Welcome to Your World: How the Built Environment Shapes Our Lives. — New York: HarperCollins, 2017. — 352 p.
7. Parolek D., Crawford K. Form-Based Codes: A Guide for Planners, Urban Designers, and Developers. — Hoboken: Wiley, 2008. — 384 p.
8. Lynch K. The Image of the City. — Cambridge, MA: MIT Press, 1960. — 194 p.
9. Иконников А. В. Художественный язык архитектуры. — М.: Искусство, 1985. — 176 с.
10. Официальный портал Администрации г. Каменск-Шахтинский [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://kamensk.donland.ru/> (дата обращения: 01.06.2026).

Исторический метод формирования архитектурно-градостроительного облика: от ретроспективных законов к современной практике

Ларионова Елизавета Николаевна, студент магистратуры
Южный федеральный университет (г. Ростов-на-Дону)

В статье рассматривается исторический метод эмоционально-художественного моделирования архитектурно-градостроительного облика (АГО) малых и средних городов. Анализируются ретроспективные «законы» формообразования, адаптированные к современным условиям. Обсуждается проблема выбора исторического периода в многослойной застройке. Описаны уровни реализации исторического метода — район, улица, фасад — с раскрытием целевых эмоций. Показаны способы интерпретации исторического наследия в дизайн-кодах, навигации и пешеходных маршрутах.

Ключевые слова: исторический метод, архитектурно-градостроительный облик, ретроспективные законы, уровни «район — улица — фасад», локальная идентичность.

Введение

Современное нормативное регулирование архитектурно — градостроительного облика (АГО) в Российской Федерации, представленное Постановлением Правительства РФ № 857, устанавливает требования к объёмно-пространственным, колористическим и материальным решениям фасадов, размещению инженерного оборудования и архитектурной подсветке объектов капитального строительства [1]. Однако данный документ не регламентирует эмоционально-художественную составляющую среды — её способность вызывать устойчивые положительные переживания, формировать чувство принадлежности к месту и локальную идентичность. В малых и средних городах, где историческая застройка часто соседствует с типовыми зданиями, особую значимость приобретает исторический метод — подход, ориентированный на сохранение, воссоздание и актуализацию наследия с опорой на ретроспективные закономерности формообразования среды [2; 3].

Ретроспективные законы как теоретическая база исторического метода

Ретроспективный анализ мирового и отечественного градостроительства позволяет выделить устойчивые инвариантные закономерности, названные в исследовании «законами эмоционально-художественного формообра-

зования». Каждый такой закон устанавливает связь между формально-пространственными характеристиками среды и целевым эмоциональным состоянием. Для исторического метода наиболее значимы следующие положения.

Закон тектонической правды (античность) — форма конструкции должна ясно выражать её работу на сжатие, изгиб или растяжение. Колонна, несущая архитрав, вызывает ощущение стабильности и надёжности. В современной практике этот закон реализуется через ясное выражение несущего каркаса, читаемые опоры и завершения (карниз, фронтон) в общественных зданиях.

Закон эстетики регламента (классицизм — ампи́р) — унификация фасадов по высоте, линии застройки, цвету и ритму порождает чувство порядка, предсказуемости и коллективной идентичности. Сегодня этот закон служит теоретической основой дизайн-кодов: единая цветовая гамма, типология вывесок, упорядочение балконов.

Закон органической линии (модерн) — плавная, текучая линия успокаивает нервную систему; прямой угол ассоциируется с трудом и напряжением. Применяется при проектировании рекреационных зон — дорожки с плавными очертаниями, изогнутые скамейки.

Закон живописного силуэта (русское средневековье) — многоглавие, асимметричное нагромождение куполов и шатров создаёт не хаос, а радостную сложность. В современных условиях может интерпретироваться через введение вертикальных акцентов и силуэтных доминант.

Закон эмоциональной кульминации (сталинский ампи́р) — ярусное нарастание массы (цоколь — ордер — лепнина — шпиль) вызывает чувство подъёма, триумфа и стабильности. Используется при формировании въездных зон и главных проспектов.

Эти законы не следует понимать как предписание к прямому стилизаторству. Они задают принципы работы с масштабом, ритмом, пропорциями, цветом и пластикой, которые могут быть реализованы современными материалами и технологиями, но при этом сохранять эмоциональную связь с исторической традицией.

Проблема выбора исторического периода в многослойной городской среде

Любой малый или средний город обладает многоэтапной историей, запечатлённой в застройке разных эпох: древнерусские храмы, купеческие особняки XIX века, здания сталинского ампира, типовые панельные дома 1960–1980х годов, постройки 1990–2000х годов с упрощённой архитектурой. Возникает вопрос: какой исторический слой следует принимать за эталон при применении исторического метода? Ошибочно полагать, что необходимо реставрировать только самый древний слой, игнорируя последующие, — это приведёт к разрушению подлинной многослойности и когнитивному диссонансу. Также некорректно смешивать элементы разных эпох без композиционной логики.

Предлагается следующий алгоритм выбора исторического периода:

1. Историко-морфологический анализ — выявление всех хронологических слоёв застройки, их сохранности, масштабных характеристик (этажность, шаг окон, ритм фасадов), материалов и цветовых решений. Составляется карта-схема распространения каждого слоя.

2. Выявление опорных объектов — зданий, которые жители устойчиво ассоциируют с городом. Методика ментального картирования по К. Линчу позволяет определить, какие объекты являются эмоциональными доминантами [4].

3. Стереотипный анализ — опросы жителей и анализ социальных сетей для выявления эмоционального отношения к разным историческим периодам. Определяется, какой слой вызывает гордость и ностальгию, а какой — раздражение или равнодушие.

4. Определение доминирующего морфотипа — того исторического слоя, который наиболее полно и целостно представлен на данной территории и обладает наибольшей градостроительной ценностью.

5. Принятие решения о стратегии — либо доминирование одного слоя с деликатным включением элементов других эпох, либо равноправный диалог нескольких слоёв (гибридный метод) при условии, что они объединены единой композиционной и колористической логикой.

Даже «непрезентабельные» этапы (типовая застройка 1960–1980х годов, примитивные постройки 1990х) содержат формообразующие элементы, которые могут быть интерпретированы в рамках исторического метода: ритм

балконов, геометрический орнамент остекления, фактура бетона, мозаичные панно. Такие элементы не следует уничижать — их можно переосмыслить как свидетельство эволюции архитектурного языка на конкретной территории.

Уровни реализации исторического метода: район — улица — фасад

Исторический метод, как и другие методы эмоционально-художественного моделирования, должен реализовываться на трёх иерархически связанных уровнях. Каждый уровень имеет свои инструменты и порождает специфические эмоциональные состояния.

Уровень района (градостроительный масштаб). На этом уровне восстанавливается или фиксируется исторический каркас: линии застройки, система высотных доминант (храмы, башни, общественные здания), силуэт, соотношение застроенных и открытых пространств. Целевые эмоции: безопасность (предсказуемая структура), гордость (узнаваемый силуэт), благоговение (вид на исторические доминанты). Инструменты: высотный регламент, зоны охраны памятников, сохранение визуальных коридоров на доминанты.

Уровень улицы (линейное пространство). Ключевые параметры: фронт застройки (единая красная линия), ритм фасадов (шаг зданий, окон, вертикальных членений), типология мощения и озеленения, размещение вывесок и малых архитектурных форм. Целевые эмоции: уют (человеческий масштаб), порядок (ритмическая регулярность), ностальгия (аутентичные детали — фонари-реплики, исторические скамейки). Инструменты: восстановление исторической профилировки карнизов, единой цветовой гаммы (колористическая археология), регламенты для балконов и кондиционеров.

Уровень фасада (архитектурная деталь). Самый детальный уровень, непосредственно воспринимаемый пешеходом. Здесь применяются: колористическая археология (восстановление аутентичных цветов по сохранившимся фрагментам штукатурки, архивным фотографиям); орнаментальная цитата (локальные декоративные мотивы — резьба, лепнина, изразцы — воспроизводятся на фризах, козырьках, решётках, малых формах); музеефикация (сохранение фрагментов подлинной кладки, раскопов, исторических мощений как экспонатов). Целевые эмоции: благоговение (детали, свидетельствующие о возрасте и ценности), гордость (ухаженность, подлинность), уют (тактильность натуральных материалов). Инструменты: реставрация лепнины, замена пластиковых окон на деревянные или ПВХ-профиль с накладными переплётами, маскировка инженерного оборудования, тёплая статичная архитектурная подсветка (2700–3000 К).

Эмоциональные предпосылки исторического метода

Исторический метод целенаправленно формирует следующие психоэмоциональные состояния:

1. Гордость — осознание ценности и уникальности наследия, сопричастность к истории. Возникает при виде отреставрированных фасадов, чистоты линий, открытых перспектив на доминанты.

2. Ностальгия — тёплое переживание прошлого, связь с предками. Актуализируется через сохранённые детали (старые двери, вывески-буквы, исторические фонари).

3. Безопасность — снижение когнитивной тревоги благодаря привычному масштабу, предсказуемому ритму, отсутствию резких диссонансов.

4. Благоговение — ощущение сопричастности к высокой культуре, духовному наследию. Вызывается видами храмов, старинных общественных зданий, музеефицированными фрагментами.

5. Уют — камерность, соразмерность человеку, традиционные формы и материалы.

Интерпретация истории в архитектурно-градостроительном облике, дизайн-коде, навигации и маршрутах

Исторический метод не ограничивается работой с фасадами. Его принципы должны последовательно проводиться через все элементы городской среды, чтобы сформировать целостный эмоциональный нарратив.

Архитектурно-градостроительный облик (АГО) — в рамках Постановления № 857 исторический метод задаёт конкретные измеримые требования: цветовую палитру, материалы, остекление, размещение инженерного оборудования. Для каждого выявленного исторического периода могут разрабатываться свои блоки требований, но в пределах одной улицы они согласуются через единую линию застройки и ограниченную палитру.

Дизайн-код — включает правила для вывесок, витрин, балконов, малых архитектурных форм, освещения, озеленения. В историческом методе дизайн-код базируется

на образцах, извлечённых из архивных фотографий и сохранившихся объектов (шрифты, типология скамеек, рисунков ограждений).

Городская навигация — может служить носителем исторической памяти. Указатели и информационные стенды выполняются в стилистике определённой эпохи (шрифты, цветовые решения). Пиктограммы стилизуются под исторические силуэты. Важно, чтобы навигация не конфликтовала с архитектурным фоном — её цвета и материалы подчиняются дизайн-коду.

Пешеходные и туристические маршруты — исторический метод позволяет построить сценарный нарратив, объединяющий разновременные объекты в единую эмоциональную историю. Маршрут может быть тематическим или хронологическим, показывающим эволюцию архитектуры. Каждая остановка сопровождается информационными материалами (стенды, аудиогид). Переходы между разновременными объектами смягчаются единым дизайн-кодом малых форм и освещения, который сохраняет постоянство на всём протяжении маршрута.

Заключение

Исторический метод формирования архитектурно-градостроительного облика малых и средних городов базируется на ретроспективных законах, которые адаптируются к современным материалам и технологиям. Выбор исторического периода в многослойной городской среде требует проведения историко-морфологического анализа, выявления опорных объектов и стереотипных опросов жителей. Реализация метода на уровнях «район — улица — фасад» обеспечивает эмоциональную связность среды и формирует целевые эмоции: гордость, ностальгию, безопасность, благоговение, уют. Интерпретация истории должна распространяться на дизайн-коды, навигацию и пешеходные маршруты, превращая городскую среду в целостный нарратив.

Литература:

1. Постановление Правительства РФ от 29 мая 2023 г. № 857 «Об утверждении требований к архитектурно-градостроительному облику объектов капитального строительства». — М., 2023.
2. Базарина Е. К., Степанова Т. А. Численный анализ визуальной сложности архитектурной среды как фактора психологического комфорта городских пространств // Вестник КГПУ им. В. П. Астафьева. — 2026. — № 2. — С. 45–53.
3. Русанова, Е. А. Архитектурно-ландшафтные методы воссоздания утраченной идентичности «портрета среды» / Е. А. Русанова, А. М. Забирко. — Текст: непосредственный // Architecture and Modern Information Technologies. — 2025. — № 1(70).
4. Lynch, K. The Image of the City / K. Lynch. — Cambridge, MA: MIT Press, 1960.

Влияние объемной доли и водопоглощения керамзитового песка на водопотребность легких смесей для строительной 3D-печати

Лосев Кирилл Александрович, студент

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

В статье рассмотрено влияние объемной доли керамзитового песка и его водопоглощения по объему на водопотребность легких смесей для строительной 3D-печати. Исследованы контрольный состав без керамзитового песка и шесть составов с тремя видами керамзитового песка K1, K2 и K3. По экспериментальным данным получены линейные зависимости приращения объемной доли воды в смеси от объемной доли керамзита вида $\Delta f_v = a \cdot f_k$. Установлено, что коэффициент a определяется водопоглощением керамзитового песка и в первом приближении описывается соотношением $a = 0,0057W_v$. На этой основе предложена обобщенная модель $\Delta f_v = 0,0057W_v \cdot f_k$, пригодная для предварительной оценки корректировки расхода воды при проектировании легких смесей для строительной 3D-печати.

Ключевые слова: строительная 3D-печать, легкая смесь, керамзитовый песок, водопоглощение, водопотребность, объемная доля воды.

Введение

Строительная 3D-печать относится к числу наиболее перспективных направлений развития аддитивных технологий в строительстве. Для таких технологий требуется смесь, способная к стабильной экструзии, сохранению формы после выхода из сопла и восприятию деформаций без нарушения сплошности [1]– [5].

Использование керамзитового песка позволяет снизить среднюю плотность материала, однако одновременно повышает водопотребность смеси вследствие пористой структуры заполнителя. Это затрудняет переход от обычных мелкозернистых смесей к легким составам, пригодным для строительной 3D-печати [3], [6], [7].

Для инженерной практики необходима простая зависимость, позволяющая оценивать дополнительное количество воды, которое требуется при введении пористого заполнителя. Целью работы является установление связи между объемной долей керамзитового песка, его водопоглощением по объему и приращением объемной доли воды в смеси.

Материалы и методы

В работе использовали портландцемент, кварцевый песок и три вида керамзитового песка, обозначенные как K1, K2 и K3. Для керамзитовых песков определяли насыпную плотность, гранулометрический состав, плотность зерен и водопоглощение по объему [6], [7]. Основным параметром заполнителя в настоящем исследовании принимали водопоглощение по объему W_v .

Экспериментальная программа включала семь составов: эталонный состав без керамзитового песка и шесть составов с пористым заполнителем. Для каждого вида керамзитового песка были приняты два уровня объемной доли керамзита. Составы подбирали при близких значениях расплыва конуса 13,5–15,0 см и растяжимости 200–220 мм/м, что позволяло сопоставлять их по водопотребности.

В качестве расчетного показателя использовали приращение объемной доли воды в смеси Δf_v относительно контрольного состава. Для каждого вида керамзитового песка зависимости $\Delta f_v = f(f_k)$ аппроксимировали линейными уравнениями, проходящими через начало координат. Угловой коэффициент a рассматривали как характеристику влияния заполнителя на дополнительную потребность смеси в воде.

Таблица 1. Экспериментальные значения для построения расчетных зависимостей

Заполнитель	W_v , %	f_{k1} , %	Δf_{v1} , %	f_{k2} , %	Δf_{v2} , %	a
K1	53,65	21,2	7,8	38,3	13,7	0,3575
K2	41,08	23,3	2,1	43,9	5,9	0,1342
K3	102,5	23,2	12,6	33,7	23,7	0,6758

Результаты и обсуждение

Анализ полученных данных показывает, что для каждого вида керамзитового песка приращение объемной доли воды возрастает по мере увеличения его объемной доли в смеси. Для заполнителя K1 получена зависимость $\Delta f_v = 0,3575f_k$,

для К2 — $\Delta\varphi_{\text{в}} = 0,1342\varphi_{\text{к}}$, для К3 — $\Delta\varphi_{\text{в}} = 0,6758\varphi_{\text{к}}$. Следовательно, дополнительная потребность смеси в воде во всех случаях описывается линейной функцией от $\varphi_{\text{к}}$, однако интенсивность роста $\Delta\varphi_{\text{в}}$ различается весьма существенно.

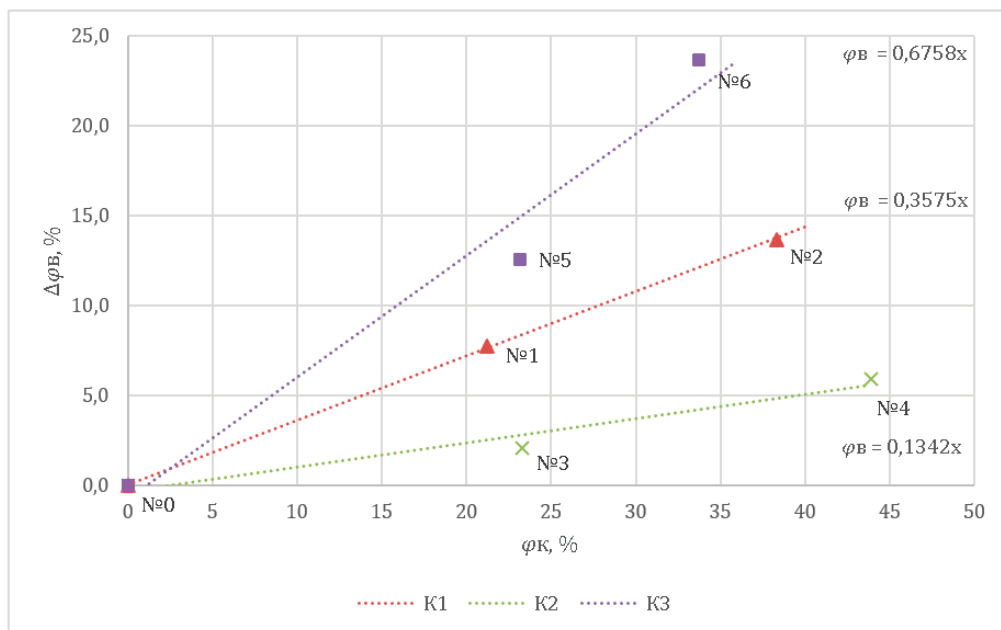


Рис. 1. Зависимость приращения объёмной доли воды $\Delta\varphi_{\text{в}}$ от объёмной доли керамзита $\varphi_{\text{к}}$

Минимальное значение коэффициента a характерно для заполнителя К2, имеющего наименьшее водопоглощение по объёму среди исследованных материалов. Для керамзитового песка К1 коэффициент a занимает промежуточное положение, а для К3 достигает наибольшего значения. Это означает, что при одинаковом увеличении объёмной доли пористого заполнителя наиболее значительное дополнительное количество воды требуется для смесей с керамзитом К3. Полученные результаты согласуются с общими представлениями о поведении пористых заполнителей в цементных системах: чем выше водопоглощение, тем большую часть воды затвердения заполнитель связывает в своей поровой структуре [3], [6], [7].

Для количественного описания указанной закономерности была рассмотрена зависимость коэффициента a от водопоглощения по объёму $W_{\text{в}}$. Аппроксимация экспериментальных данных позволила представить ее в виде линейного соотношения $a = 0,0057W_{\text{в}}$. Несмотря на ограниченное число исследованных заполнителей, данное выражение отражает общую тенденцию: повышение водопоглощения керамзитового песка приводит к росту чувствительности смеси к введению пористого заполнителя в части дополнительной потребности в воде.

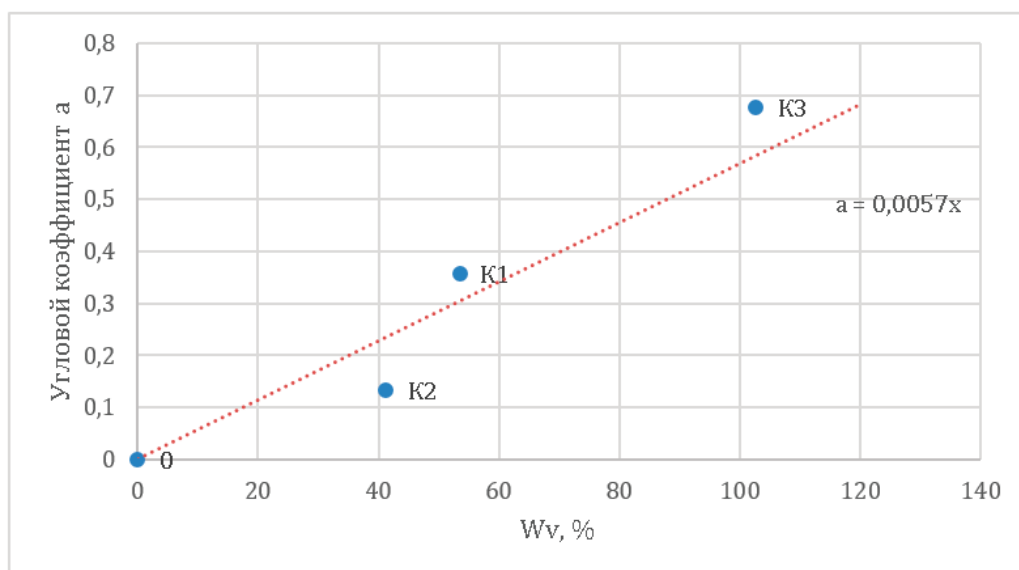


Рис. 2. Зависимость углового коэффициента a от водопоглощения керамзитового песка по объёму

Подстановка выражения для коэффициента a в ранее полученную зависимость $\Delta f_v = a \cdot f_k$ дает обобщенную модель $\Delta f_v = 0,0057 W_v \cdot f_k$. С инженерной точки зрения это уравнение представляет наибольший интерес, поскольку позволяет оценить изменение объемной доли воды одновременно по двум параметрам: свойству заполнителя и его содержанию в смеси.

Для практического использования модели может быть выполнен предварительный расчет. Например, для керамзитового песка с водопоглощением $W_v = 60\%$ при объемной доле керамзита $f_k = 30\%$ приращение объемной доли воды составит $\Delta f_v = 0,0057 \cdot 60 \cdot 30 = 10,26\%$. Следовательно, уже на этапе предварительного подбора состава можно оценить дополнительную потребность смеси в воде и избежать значительного числа опытных корректировок.

Практическая ценность полученной зависимости заключается в возможности ее использования при предварительном проектировании легких смесей для строительной 3D-печати. Сначала по условию средней плотности определяется требуемая объемная доля керамзита, после чего по модели $\Delta f_v = 0,0057 W_v \cdot f_k$ рассчитывается дополнительная объемная доля воды, необходимая для сохранения требуемых технологических свойств смеси.

Таблица 2. Расчетные зависимости, полученные по экспериментальным данным

Этап анализа	Уравнение	Инженерный смысл
Для каждого вида заполнителя	$\Delta f_v = a \cdot f_k$	Оценка приращения объемной доли воды при заданной объемной доле керамзита
Связь коэффициента a со свойством заполнителя	$a = 0,0057 W_v$	Оценка влияния водопоглощения керамзитового песка на водопотребность смеси
Обобщенная модель	$\Delta f_v = 0,0057 W_v \cdot f_k$	Предварительный расчет корректировки расхода воды при проектировании состава

Вместе с тем предложенную зависимость следует рассматривать как расчетно-экспериментальную и требующую дальнейшего уточнения. Она получена по ограниченному числу видов заполнителя и уровней объемной доли керамзита, поэтому в дальнейшем требуется расширение числа экспериментальных точек, а также проверка модели для составов с иными уровнями подвижности и при использовании пластифицирующих добавок.

Заключение

На основании анализа экспериментальных данных можно сделать следующие выводы.

Для легких смесей на керамзитовом песке, предназначенных для строительной 3D-печати, приращение объемной доли воды относительно контрольного состава возрастает с увеличением объемной доли пористого заполнителя.

Для каждого вида керамзитового песка зависимость дополнительной объемной доли воды от объемной доли керамзита удовлетворительно описывается линейным уравнением вида $\Delta f_v = a \cdot f_k$. Значения коэффициента a составили 0,3575 для K1, 0,1342 для K2 и 0,6758 для K3.

Установлено, что коэффициент a связан с водопоглощением керамзитового песка по объему. В первом приближении данная зависимость может быть представлена соотношением $a = 0,0057 W_v$.

Предложенная обобщенная расчетно-экспериментальная модель $\Delta f_v = 0,0057 W_v \cdot f_k$ позволяет оценивать дополнительную потребность смеси в воде при введении керамзитового песка.

Полученная зависимость может быть использована при предварительном проектировании легких смесей для строительной 3D-печати, однако для расширения области ее применения необходимы дальнейшие исследования.

Литература:

- ГОСТ Р 59096–2020. Материалы для аддитивного строительного производства. Методы испытаний.
- ГОСТ Р 59097–2020. Материалы для аддитивного строительного производства. Технические требования.
- Иноземцев А. С. Современная теория и практика технологии бетонов для 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 216–245. DOI: 10.22227/1997–0935.2024.2.216–245.
- Славчева Г. С., Бритвина Е. А., Ибряева А. Строительная 3D-печать: оперативный метод контроля реологических характеристик смесей // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2019. № 4 (41). С. 134–143.
- Бритвина Е. А., Славчева Г. С. Показатели технологичности цементных смесей для строительной 3D-печати: моделирование и экспериментальные исследования // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 4 (49). С. 56–65.
- ГОСТ 25820–2021. Бетоны легкие. Технические условия.
- ГОСТ 9758–2012. Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний.

Количественная оценка механической совместимости материалов при ремонте бетонных конструкций

Пичков Сергей Денисович, студент магистратуры
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

В статье представлены результаты экспериментального исследования деформационных характеристик цементных композитов различной прочности, полученных изменением водоцементного отношения. Исследования выполнены в рамках разработки метода оценки механической совместимости ремонтного состава с бетонным основанием. Для моделирования материалов различной прочности были изготовлены мелкозернистые бетонные образцы с водоцементным отношением 0,4; 0,5 и 0,6. Разрушающая нагрузка образцов составила 233, 180 и 151 кН, что соответствует пределу прочности при сжатии 47,6; 36,7 и 30,8 МПа для составов с В/Ц = 0,4; 0,5 и 0,6 соответственно. Испытания проводились методом ступенчатого кратковременного нагружения в соответствии с требованиями ГОСТ 24452–80. Установлено, что даже при одинаковом компонентном составе изменение водоцементного отношения приводит к существенному различию деформационных характеристик материалов. Полученные результаты подтверждают необходимость учета совместной деформации материалов при подборе ремонтных составов и послужили основой для разработки метода количественной оценки механической совместимости системы «основание — ремонтный состав».

Ключевые слова: ремонтный состав, механическая совместимость, бетонное основание, деформации, водоцементное отношение, прочность, долговечность ремонта.

Введение

Ремонт и восстановление бетонных и железобетонных конструкций являются одной из наиболее актуальных задач современного строительства. В процессе эксплуатации конструкции подвергаются воздействию механических нагрузок, температурно-влажностных воздействий, процессов карбонизации и коррозии арматуры, что приводит к образованию трещин, сколов, разрушению защитного слоя бетона и снижению эксплуатационной надежности сооружений.

Современные ремонтные материалы позволяют восстанавливать геометрию конструкций и обеспечивать высокие показатели прочности и адгезии к основанию. Однако практика эксплуатации показывает, что долговечность ремонта определяется не только прочностью ремонтного состава, но и его способностью совместно работать с существующим бетоном. Во многих случаях повторное разрушение начинается именно в зоне контакта материалов вследствие различия их деформационных характеристик.

Согласно ГОСТ Р 56378–2015 основными нормируемыми характеристиками ремонтных составов являются прочность на сжатие, прочность сцепления, морозостойкость и другие эксплуатационные показатели. Вместе с тем в нормативных документах отсутствует количественная оценка механической совместимости материалов по их способности совместно деформироваться под действием нагрузки.

Особенно актуальна данная проблема при использовании современных высокопрочных ремонтных составов для восстановления конструкций из бетона пониженной прочности. В подобных системах возникают дополнительные внутренние напряжения, вызванные различием деформаций материалов, что способствует образованию микротрещин и снижению долговечности ремонта.

Целью настоящей работы является исследование влияния прочности цементных композитов на их деформационное поведение и разработка подхода к количественной оценке механической совместимости ремонтного состава с бетонным основанием.

Материалы и методы

Для проведения исследований использовались мелкозернистые цементные композиты одинакового компонентного состава. В качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, в качестве мелкого заполнителя — кварцевый песок фракции 0–2,5 мм. Для регулирования удобоукладываемости смесей использовался суперпластификатор Vinavil Flux 3.

Различие физико-механических характеристик материалов обеспечивалось исключительно изменением водоцементного отношения. Были изготовлены три серии образцов: состав № 1 — В/Ц = 0,6; состав № 2 — В/Ц = 0,5; состав № 3 — В/Ц = 0,4.

Испытания выполнялись методом ступенчатого кратковременного нагружения в соответствии с требованиями ГОСТ 24452–80. Нагрузка прикладывалась ступенями до достижения предельного состояния образца. На каждой ступени фиксировались значения деформаций.

По результатам испытаний были определены разрушающие нагрузки и рассчитаны пределы прочности при сжатии. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Прочностные характеристики исследуемых образцов

В/Ц	Разрушающая нагрузка, кН	Предел прочности при сжатии, МПа
0,6	151,0	30,8
0,5	180,0	36,7
0,4	233,0	47,6

Для корректного сопоставления материалов различной прочности использовался относительный уровень нагружения P/R , где P — текущая нагрузка, а R — разрушающая нагрузка соответствующего образца.

Результаты и обсуждение

Результаты ступенчатого нагружения представлены в таблице 1.

Таблица 2. Значения нагрузок на ступенях нагружения при испытании образцов

Относительный уровень нагрузки P/R	Нагрузка для В/Ц = 0,6, кН	Нагрузка для В/Ц = 0,5, кН	Нагрузка для В/Ц = 0,4, кН
0,10	15,1	18,0	23,3
0,20	30,2	36,0	46,6
0,30	45,3	54,0	69,9
0,40	60,4	72,0	93,2
0,50	75,5	90,0	116,5
0,60	90,6	108,0	139,8
0,70	105,7	126,0	163,1
0,80	120,8	144,0	186,4
0,90	135,9	162,0	209,7

Для оценки влияния прочности на деформационное поведение материала были построены зависимости полных деформаций от уровня относительного нагружения.

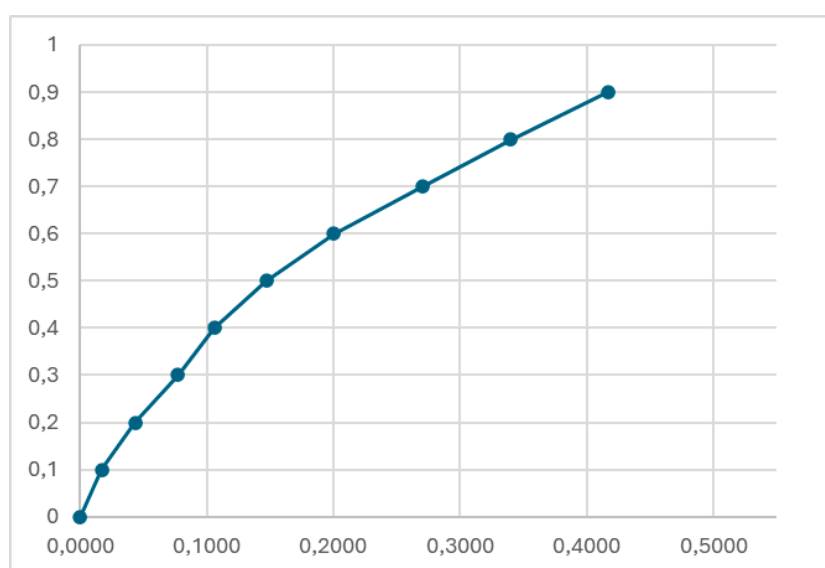


Рис. 1. Зависимость полных деформаций бетона с В/Ц = 0,6 от уровня относительного нагружения

Анализ полученных зависимостей показывает, что изменение водоцементного отношения оказывает существенное влияние на деформационное поведение материала.

Наибольшие деформации наблюдаются у состава с В/Ц = 0,6, имеющего наименьший предел прочности при сжатии — 30,8 МПа. Для данного материала характерен наиболее интенсивный рост деформаций уже на начальных стадиях нагружения, что свидетельствует о повышенной податливости структуры цементного камня.

Уменьшение водоцементного отношения до 0,5 приводит к увеличению предела прочности до 36,7 МПа и сопровождается снижением деформативности материала. Кривая деформаций имеет более пологий характер по сравнению с составом В/Ц = 0,6.

Наиболее высокие показатели прочности были получены для состава с В/Ц = 0,4. Предел прочности при сжатии составил 47,6 МПа, что на 54 % выше аналогичного показателя состава с В/Ц = 0,6. При этом наблюдается наиболее равномерное развитие деформаций, свидетельствующее о формировании более плотной структуры цементного камня и повышенной жесткости материала.

Полученные результаты имеют принципиальное значение для оценки механической совместимости материалов. Следует отметить, что все исследуемые составы были изготовлены из одинаковых компонентов, а единственным изменяемым параметром являлось водоцементное отношение. Несмотря на это, различия в прочности сопровождались существенными различиями в деформационном поведении материалов.

Сопоставление полученных зависимостей показывает, что даже материалы одинакового состава могут иметь различную деформативность вследствие изменения структуры цементного камня и достигнутой прочности. Следовательно, использование только показателей прочности на сжатие или прочности сцепления не позволяет достоверно прогнозировать долговечность ремонтной системы.

На практике аналогичная ситуация возникает при ремонте бетонных конструкций, когда высокопрочный ремонтный состав наносится на бетон основания меньшей прочности. Под действием эксплуатационной нагрузки материалы воспринимают различные деформации. Более жесткий ремонтный материал деформируется в меньшей степени, тогда как основание испытывает большие деформации.

В результате в контактной зоне возникают дополнительные касательные и растягивающие напряжения. При многократном воздействии нагрузок происходит накопление повреждений, образование микротрещин и снижение прочности сцепления материалов. В дальнейшем это приводит к отслоению ремонтного слоя и повторному разрушению восстановленного участка конструкции.

Таким образом, результаты проведенных исследований подтверждают необходимость учета деформационных характеристик при подборе ремонтных материалов и разработке критериев механической совместимости.

Даже при изменении прочности материала от 30,8 до 47,6 МПа, достигнутом исключительно за счет изменения водоцементного отношения, наблюдается существенное изменение деформационного поведения цементного композита. Это подтверждает необходимость учета деформационных характеристик наряду с прочностью при оценке механической совместимости ремонтных составов с бетонным основанием.

Заключение

На основании анализа экспериментальных данных можно сделать следующие выводы.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Изменение водоцементного отношения оказывает существенное влияние как на прочность, так и на деформационные характеристики цементных композитов.
2. Предел прочности исследованных составов составил 30,8 МПа для В/Ц = 0,6, 36,7 МПа для В/Ц = 0,5 и 47,6 МПа для В/Ц = 0,4.
3. Даже при одинаковом компонентном составе изменение водоцементного отношения приводит к различному деформационному поведению материалов.
4. Более прочные составы характеризуются меньшими деформациями и большей жесткостью структуры.
5. Различие деформационных характеристик материалов является одной из основных причин возникновения дополнительных напряжений в зоне контакта ремонтного слоя и бетонного основания.
6. Для обеспечения долговечности ремонта необходимо учитывать не только прочность на сжатие и прочность сцепления, но и способность материалов совместно деформироваться под действием эксплуатационных нагрузок.
7. Предложенный коэффициент механической совместимости позволяет количественно оценивать совместную работу ремонтного состава и основания и может использоваться при выборе материалов для ремонта бетонных и железобетонных конструкций.

Литература:

1. ГОСТ Р 56378–2015. Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к ремонтным смесям.

2. ГОСТ 24452–80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона.

3. ГОСТ 32016–2012. Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Общие требования.

4. ГОСТ Р 58277–2018. Смеси сухие строительные ремонтные и защитные. Технические условия.

5. Стельмах С. А., Щербань Е. М., Маилян Л. Д., Маилян А. Л. Прочность бетонов с улучшенной структурой и свойствами с использованием высокопрочного гранитного щебня и модификацией микрокремнезема // Строительные материалы.

6. ГОСТ 31108–2020. Цементы общестроительные. Технические условия.

7. Пичков С. Д. К вопросу об обеспечении механической совместимости ремонтных составов с основанием // Молодой ученый. 2026. № 20.

Развитие инженерно-сетевой инфраструктуры в городе Екатеринбург

Пыхтина Ольга Андреевна, студент
Уральский государственный экономический университет (г. Екатеринбург)

В статье на основе анализа двух редакций инвестиционной программы МУП «Водоканал» на период до 2035 года рассматриваются ключевые направления модернизации систем водоснабжения и водоотведения. Выявлены основные группы мероприятий: подключение новых абонентов, снижение износа сетей, повышение качества воды (удаление марганца, нитратов, жесткости), энергоэффективность и экологическая безопасность. Общй объем финансирования на 2024–2035 гг. превышает 32,8 млрд руб. (без НДС). Сделан вывод о необходимости комплексного подходе к развитию инфраструктуры мегаполиса.

Ключевые слова: инфраструктура, инвестиционная программа, водоснабжение, водоотведение, модернизация, надежность, качество воды.

Устойчивое развитие крупных городов невозможно без надежной инженерной инфраструктуры. ГО Екатеринбург характеризуется значительным износом сетей водоснабжения и водоотведения (до 70 %) и активным жилищным строительством в новых районах. Первоначальная инвестиционная программа (приказ № 460 от 30.11.2017) была рассчитана на 2020–2025 гг. Корректировки от 19.11.2024 № 711 и от 19.11.2025 № 702 продлили горизонт до 2035 г. Цель работы — систематизировать структуру, выявить приоритеты, оценить объемы и источники финансирования.

Программа водоснабжения включает 6 групп мероприятий. Группа 1 (строительство для подключения абонентов): п. 1.1.15 — сети диаметром 40–250 мм протяженностью 27,4 км (стоимость от 597 до 1 243 млн руб. в разных версиях); строительство дюкеров под р. Патрушиха. Группа 2 (новые объекты): водовод 1200 мм через Верх-Исетский пруд (1 млрд руб., 2029–2032). Группа 3 (снижение износа): модернизация водовода по ул. Тех-

нической (143 млн руб.) и «Юмашевского» (2,4 млрд руб. в 2034–2035). Группа 4 (качество воды, 2,64 млрд руб.): УФ-обеззараживание на Западной фильтровальной станции (1,51 млрд руб., 2027–2032), удаление марганца в пос. Садовый (превышение ПДК в 2,2 раза). Группа 5 (демонтаж): 7 объектов за 19 млн руб. Группа 6 (АСУТП): 85 млн руб. Общий объем инвестиций в водоснабжение — 18 854 млн руб. (вер. 2024) и 19 246 млн руб. (вер. 2025).

Программа водоотведения акцентирована на реконструкции коллекторов и очистных сооружений: замена коллектора на ул. Ясной (ДУ800 мм), реконструкция КНС № 51 и 55 (рост производительности с 1,03 до 2,16 тыс. м³/сут и с 16,5 до 31,6 тыс. м³/сут; 4,29 млрд руб.), модернизация Северной аэрационной станции (блок когенерации 1200 кВт, удаление фосфатов — 195 млн руб.), демонтаж хлораторной (40 млн руб.). Общий объем инвестиций в водоотведение — 13 994,7 млн руб. Наиболее значимые индикаторы программы представлены в таблице 1.

Таблица 1. Наиболее значимые индикаторы программы

Показатель	Ед. изм.	2024 г. (факт/база)	2035 г. (план)	Изменение
Доля проб воды на выходе со станций, не соотв. нормативам	%	9,48	4,36	↓ 54 %
Количество аварий на 1 км водопроводной сети	ед./км	1,21	1,21	стабильно
Удельный расход э/э на транспортировку воды	кВт·ч/м³	0,5290	0,5340	+0,9 %
Доля проб сточных вод, не соотв. нормативам сброса	%	55,63	25,00	↓ 55 %
Удельное количество аварий на 1 км канализации	ед./км	7,45	7,29	↓ 2,1 %

Снижение доли некачественной питьевой воды вдвое и улучшение очистки сточных вод до 25 % несоответствий — ключевые экологические результаты. Программа не предусматривает бюджетного финансирования. Источники: амортизация — 1,1 % (214 млн руб.), нормативная прибыль — 67,9 % (12 797 млн руб.), плата за подключение — 31,0 % (5 843 млн руб.), плата за сверхнормативный сброс (только водоотведение) — 13,6 % (1 898 млн руб.). Таким образом, программа опирается на тарифные надбавки и платежи застройщиков.

Так, программа демонстрирует переход к долгосрочному управлению (12 лет) с детальными показателями. Основное внимание уделено качеству воды: ликвидация нецентрализованных систем в поселках БАМ, Садовый, Изоплит устраняет многолетние превышения ПДК. Однако крупные проекты модернизации магистральных водоводов («Юмашевский», «Эльмашевский») отодвинуты на 2030–2035 гг., что создает риски аварийности в ближайшие годы. Высокая доля нормативной прибыли (почти 68 %) означает опережающий рост тарифов, что требует

мониторинга доступности услуг. Сравнение версий 2024 и 2025 гг. показывает уточнение стоимости и сроков; версия 2025 г. более детализирована.

Инвестиционная программа МУП «Водоканал» на 2024–2035 гг. — комплексный документ, отличающийся долгосрочным горизонтом, приоритетом повышения качества питьевой воды (снижение нестандартных проб с 9,48 % до 4,36 %) и экологической эффективности очистки сточных вод (снижение доли несоответствий с 55,6 % до 25 %).

Финансирование исключительно за счет тарифных источников и платы за подключение обеспечивает независимость от бюджета, но требует контроля за ростом тарифов.

Рекомендации:

1. Обеспечить ежегодный публичный отчет о ходе реализации программы с верификацией достигнутых показателей.
2. Усилить контроль за целевым использованием платы за подключение, составляющей почти треть инвестиций.

Литература:

1. Об утверждении инвестиционной программы Екатеринбургского муниципального унитарного предприятия водопроводно-канализационного хозяйства на 2020–2025 годы (развитие инфраструктуры водоснабжения и водоотведения): приказ Министерства энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Свердловской области от 30.11.2017 № 460 (ред. от 19.11.2024 № 711, от 19.11.2025 № 702) // Официальный интернет-портал правовой информации Свердловской области. — 2018. — 25 янв. — № 16321. — 84 с.
2. О внесении изменений в приказ Министерства энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Свердловской области от 30.11.2017 № 460 «Об утверждении инвестиционной программы Екатеринбургского муниципального унитарного предприятия водопроводно-канализационного хозяйства на 2020–2025 годы (развитие инфраструктуры водоснабжения и водоотведения)»: приказ Министерства энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Свердловской области от 19.11.2024 № 711. — Екатеринбург, 2024. — 84 с.
3. О внесении изменений в приказ Министерства энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Свердловской области от 30.11.2017 № 460 «Об утверждении инвестиционной программы Екатеринбургского муниципального унитарного предприятия водопроводно-канализационного хозяйства на 2020–2025 годы (развитие инфраструктуры водоснабжения и водоотведения)»: приказ Министерства энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Свердловской области от 19.11.2025 № 702. — Екатеринбург, 2025. — 85 с.

Молодой ученый

Международный научный журнал

№ 23 (626) / 2026

Выпускающий редактор Г. А. Письменная
Ответственные редакторы Е. И. Осянина, О. А. Шульга, З. А. Огурцова
Художник Е. А. Шишков
Подготовка оригинал-макета П. Я. Бурьянов, М. В. Голубцов, О. В. Майер

За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы.
Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов.
При перепечатке ссылка на журнал обязательна.
Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал размещается и индексируется на портале eLIBRARY.RU, на момент выхода номера в свет журнал не входит в РИНЦ.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-38059 от 11 ноября 2009 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

ISSN-L 2072-0297

ISSN 2077-8295 (Online)

Учредитель и издатель: ООО «Издательство Молодой ученый». 420029, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25, пом. 1, 3, 4, 5, 6.

Номер подписан в печать 17.06.2026. Дата выхода в свет: 24.06.2026.

Формат 60×90/8. Тираж 500 экз. Цена свободная.

Почтовый адрес редакции: 420140, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Юлиуса Фучика, д. 94А, а/я 121.

Фактический адрес редакции: 420029, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25, пом. 1, 3, 4, 5, 6.

E-mail: info@moluch.ru; <https://moluch.ru/>

Отпечатано в типографии издательства «Молодой ученый», 420029, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25, пом. 1, 3, 4, 5, 6.