

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Строительство.
Электротехника и химические технологии»**

Научный рецензируемый журнал

№ 1 (29), 2026

Тверь 2026

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2026. № 1 (29). 104 с.

Включает научные статьи, подготовленные на основе результатов исследований и экспериментальных разработок в области строительства, электротехники и химических наук, выполненных учеными и специалистами-практиками ведущих вузов и научно-исследовательских учреждений нашей страны и зарубежья. Представлены работы, соответствующие профилю издания по следующим научным специальностям: 2.1.5 Строительные материалы и изделия; 2.4.4 Электротехнология и электрофизика; 2.6.10 Технология органических веществ.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: Эл № ФС77-74949 (онлайн) от 25 января 2019 г.

Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

ISSN 2686-794X (онлайн)

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Анкушина С.К., Киселев А.Д., Двужилов А.С., Соколов С.А.</i> Определение геометрических параметров объекта строительства при помощи технологий искусственного интеллекта.....	5
<i>Белов Н.А., Курятников Ю.Ю., Белов В.В.</i> Самовосстанавливающиеся декоративные бетоны для изготовления малых архитектурных форм.....	12
<i>Кабанов Ю.Е., Иванов С.А., Гуркин И.С.</i> Оценка структурно-группового состава битумов, модифицированных резиновой крошкой, методом ИК-спектроскопии.....	20
<i>Субботин С.Л., Крылов А.Д.</i> Расчет и сравнение осадок фундаментной плиты по разным моделям грунтового основания в современном программно-вычислительном комплексе.....	26
<i>Черняев А.А., Марфин К.В.</i> Оценка остаточного ресурса и срока службы железобетонной балки покрытия здания котельной в условиях агрессивной среды....	35

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Безденежных В.И.</i> Обоснование приближенного метода холостого хода для раздельного определения рассеяния обмоток трансформаторов.....	44
<i>Корнеев К.Б., Корнеев В.К.</i> Обеспечение информационной безопасности в электроэнергетике	50
<i>Павлов В.Д.</i> Искусственная (электромагнитная) упругость	59
<i>Попов И.П.</i> Сопоставление переходного процесса в цепи пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой с процессом зарядки конденсатора	64
<i>Шум Ал.А., Ветошкин А.М.</i> Теорема о плоскостях n -симметрии выпуклого тела.....	69

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Белов В.В.</i> Связь капиллярного сцепления со структурой и формовочными свойствами керамических пресс-порошков. Часть 1. Разработка методики оценки параметров макроструктуры пресс-порошков	77
<i>Родионов М.В., Смирнов С.К., Цветков Д.Ю., Петрова А.И., Лакина Н.В., Долуда В.Ю.</i> Сравнительная оценка каталитической активности Pt/Al_2O_3 и Pt/SiO_2 в реакции окисления L-сорбозы.....	86
<i>Соболев А.Е., Старовойтова Н.Ю., Долуда В.Ю.</i> Кинетика гидрохимического окисления антимонита в растворах азотной кислоты	93

CONTENTS**CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**

<i>Ankushina S.K., Kiselyov A.D., Dvuzhilov A.S., Sokolov S.A.</i> Determination of geometric parameters of a construction object using artificial intelligence technologies	5
<i>Belov N.A., Kuryatnikov Yu.Yu., Belov V.V.</i> Self-healing decorative concretes for the manufacture of small architectural forms.....	12
<i>Kabanov Yu.E., Ivanov S.A., Gurkin I.S.</i> Assessment of the group composition of rubber crumb modified bitumen by infrared spectroscopy.....	20
<i>Subbotin S.L., Krylov A.D.</i> Calculation and comparison of foundation slab sediments according to different models of the soil base in modern software and computing complex.....	26
<i>Chernyaev A.A., Marfin K.V.</i> Assessment of the residual life and service life of a reinforced concrete roof beam of a boiler house in an aggressive environment.....	35

ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Bezdeneshnykh V.I.</i> Rationale for an approximate no-load method for separate determination of transformer winding dispersion	44
<i>Korneev K.B., Korneev V.K.</i> Ensuring information security in the electric power industry ...	50
<i>Pavlov V.D.</i> Artificial (electromagnetic) elasticity	59
<i>Popov I.P.</i> Comparison of transient process in piezoelectric converter circuit with elastic load with capacitor charging process	64
<i>Shum A.A., Vetoshkin A.M.</i> The n -symmetry planes theorem of a convex body.....	69

CHEMICAL TECHNOLOGY

<i>Belov V.V.</i> Connection of capillary adhesion with structure and molding properties of ceramic press powders. Part 1. Development of evaluation methodology parameters of macrostructure of press powders.....	77
<i>Rodionov M.V., Smirnov S.K., Tsvetkov D.Yu., Petrova A.I., Lakina N.V., Doluda V.Yu.</i> Evaluation of the catalytic activity of Pt/Al ₂ O ₃ and Pt/SiO ₂ in the oxidation reaction of L-Sorbose.....	86
<i>Sobolev A.E., Starovoytova N.Yu., Doluda V.Yu.</i> Kinetics of antimonite's hydrochemical oxidation in solutions of nitric acid	93

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 69.032

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

С.К. Анкушина, А.Д. Киселев, А.С. Двужиллов, С.А. Соколов
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Анкушина С.К., Киселев А.Д.,
Двужиллов А.С., Соколов С.А., 2026

Аннотация. В статье исследована методика определения геометрических параметров строительных объектов. При использовании технологий искусственного интеллекта проведен анализ фото- и спутниковых снимков. Оценена точность определения размеров панельных жилых зданий. Определены ключевые факторы, влияющие на достоверность результатов измерений. Предложен способ обработки пространственных данных с применением искусственного интеллекта, позволяющий существенно сократить временные затраты и повысить объективность получаемых результатов. Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанной методики при планировании ремонтных работ жилищного фонда.

Ключевые слова: искусственный интеллект, определение геометрических параметров, строительные объекты, панельные здания, фотоизображения, спутниковые данные, автоматизированная обработка, ремонтные работы, техническое обследование, компьютерные технологии.

DOI: 10.46573/2658-7459-2026-1-5-11

ВВЕДЕНИЕ

В условиях расширения городской среды и увеличения объемов возводимого жилья особенно остро встает задача быстрого и точного определения параметров зданий, включая панельные многоквартирные дома, подлежащие ремонту. Традиционные методы, такие как ручные измерения, геодезические работы и использование CAD-программ, требуют значительных трудозатрат, временных ресурсов и подвержены человеческим ошибкам, что ограничивает их эффективность при масштабном контроле территорий и планировании ремонтных работ жилых массивов [1–4].

Современные технологии предоставляют возможность получения информации о земной поверхности посредством аэрофотосъемки, спутниковых изображений, беспилотных летательных аппаратов и трехмерных сканеров. Эти инструменты играют ключевую роль в сборе данных, однако для их эффективного применения необходимо автоматизировать процессы обработки и анализа информации. В этом контексте

искусственный интеллект (ИИ) и системы компьютерного зрения демонстрируют высокую эффективность [5]. Они существенно сокращают временные затраты на измерения, повышают точность и объективность результатов. Однако практическое внедрение ИИ-решений сдерживается отсутствием систематизированной оценки достоверности результатов анализа строительных объектов, в частности анализа фотографий зданий. Для принятия проектных решений критически важно понимать, насколько точны предсказания ИИ, какие факторы влияют на качество измерений и в каких условиях метод дает надежные результаты.

Рассмотрим технологию автоматического определения размеров зданий с использованием фотографий и спутниковых данных. Проанализируем точность определения геометрических параметров панельных жилых зданий с использованием фотоизображений и методов ИИ, уделив особое внимание выявлению факторов, влияющих на надежность и достоверность результатов. Эта методика приобретает высокую значимость в контексте реализации масштабных проектов по реновации и модернизации жилищного фонда.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Традиционно размеры зданий определяются путем ручных измерений либо при помощи специализированного геодезического оборудования. Однако ручные измерения занимают много времени и подвержены ошибкам, связанным с человеческим фактором, а геодезические инструменты хотя и обеспечивают высокую точность, но их использование затрудняет сложный рельеф и эксплуатация дорог вблизи зданий. Кроме того, оба этих метода требуют большого количества как материальных, так и человеческих ресурсов, что существенно ограничивает их применение в больших масштабах.

С другой стороны, современное развитие технологий дистанционных наблюдений сделало возможным получение высококачественных снимков поверхности Земли, включая аэро- и спутниковые фотографии. Наличие таких данных позволяет автоматически оценивать размеры объектов с помощью современных вычислительных методов.

Однако обработка большого объема пространственных и топографических данных остается сложной задачей. Необходимость распознавания контуров здания, учета перспективных искажений и шумов изображений повышает требования к методикам обработки. Ручная обработка такого объема данных трудозатратна, даже при использовании специализированных программ. Для исключения человеческого фактора при работе с данными, автоматизации процесса и уменьшения трудозатрат предлагается использовать технологии ИИ.

В качестве примера использования ИИ для обработки данных о зданиях и сооружениях рассмотрим получение количественных значений параметров панельного дома в городе Твери (Тверская область).

При подборе изображений для ИИ следует учитывать [5]:

разрешение фотографий. При низком разрешении (<5 Мп) модели ИИ хуже распознают мелкие элементы фасада (узкие окна, вентиляционные решетки). Высокое разрешение (>8 Мп) заметно улучшает детализацию результатов;

освещение. В пасмурную погоду или при слабом освещении точность снижается: тени и блики затрудняют выделение границ;

ракурс съемки. Фронтальный вид (под углом до 30°) дает наилучшие результаты. При больших углах ($>45^\circ$) возникают перспективные искажения, усложняющие корректное определение размеров;

состояние фасада. Загрязнения, растительность, повреждения или нестандартные элементы (навесы, кондиционеры) могут сбивать ИИ, который либо игнорирует такие участки, либо ошибочно их интерпретирует;

архитектурную сложность. Здания с выступающими элементами, такими как балконы, лоджии, или нестандартной планировкой требуют дополнительной настройки параметров анализа ИИ для точной обработки.

Все перечисленные факторы влияют на качество обработки данных и точность результатов. Помимо этого, для получения более точных результатов рекомендуется указывать уже известные размеры здания или другие ориентиры, по которым ИИ сможет отмасштабировать изображение и выдать максимально приближенный к действительности результат обработки данных.

Примером таких ориентиров в нашем случае является указанный на спутниковых снимках здания линейный масштаб (рис. 1), наличие которого позволяет более точно определить длину и ширину здания [6].

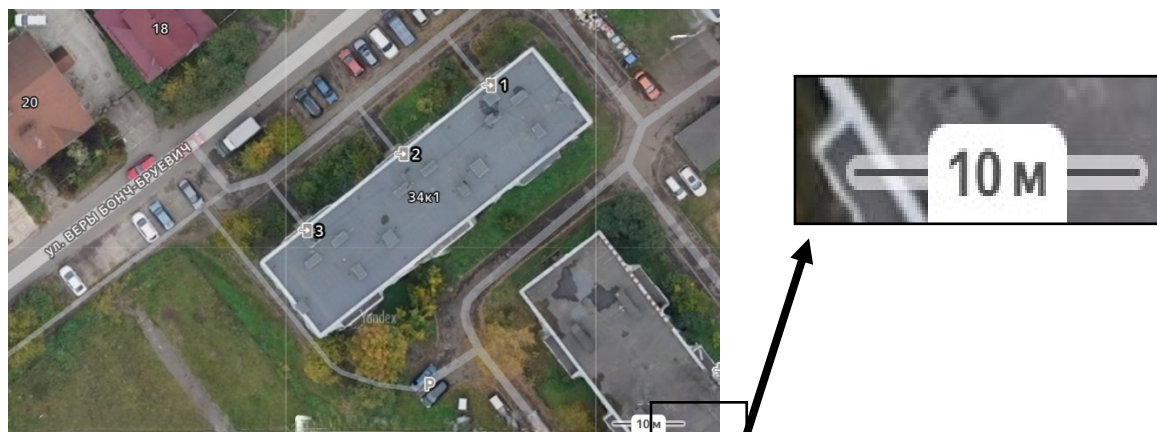


Рис. 1. Вид здания сверху и линейный масштаб [6]

При подборе фотографий стоит также учитывать, что важно именно разнообразие различных ракурсов здания, а не количество одинаковых по сути изображений.

Помимо получаемых ИИ изображений, на результат влияет сам запрос для ИИ, т. е. промт. Для ИИ он так же важен, как и данные для обработки, поскольку позволяет системе понять намерения человека и выдать наиболее качественный результат. К преимуществам, грамотного составления промта относятся:

точность результата. Правильно составленный промт позволяет получить результат, максимально соответствующий ожиданиям;

эффективность. Хорошо сформулированный промт дает возможность получить желаемый результат быстрее и с меньшим количеством действий;

экономия ресурсов. Точный промт снижает вероятность получения ошибочных или бесполезных результатов, что экономит вычислительные ресурсы;

гибкость и контроль. Умение составлять промты позволяет управлять возможностями ИИ и достигать конкретных целей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа данных использовалась платформа Jay Flow [7], которая объединяет в себе множество нейросетей и инструментов работы с ними. Наличие возможности работать одновременно с несколькими ИИ позволит получить более совершенные результаты, так как у каждой из нейросетей есть свои преимущества, и их совместная работа дополнительно исключает появление ошибок. Фотография, загруженная для анализа на платформу Jay Flow [7], представлена на рис. 2.



Рис. 2. Исследуемое здание

Обработав фотографии согласно запросу, ИИ описал основные параметры здания, изображенного на фотографиях, и выделил их основные особенности:

«На основе анализа фасадов и спутниковых снимков, дом опознан как принадлежащий серии 1-447С-54, которая относится к классическим советским пятиэтажным панельным домам 1960–1970-х годов («брежневка»). Ключевые признаки:

Характерная плиточная отделка панелей с рельефом.

Пять этажей.

Форма балконов и их выступ.

Обычные прямоугольные окна стандартных размеров.

Три подъезда, по четыре окна между подъездами.

Три ряда балконов на фасаде.

Анализируя полученную информацию, можно сделать вывод о том, правильно ли нейросеть определила здание и его основные характеристики. В нашем случае все указанные параметры дома соответствуют действительности [8].

Затем следует перейти к нахождению основных размеров здания. Здесь ИИ уточняет, что для определения длины и ширины был использован снимок со спутника с указанным линейным масштабом.

Размеры здания:

длина: ≈ 48 м (10 м $\times 4,8$);

ширина: ≈ 12 м;

высота: 5 этажей, обычно высота этажа 2,6–2,7 м, высота цоколя $\pm 0,5$ м. $5 \times 2,7 + 0,5 = 14$ м.

Окна:

ширина окна: $\approx 1,2$ м;

высота: $\approx 1,3$ м (стандартные окна в панельных домах типа серии 447).

Балконы:

длина балкона $\approx 2,5$ м;

ширина $\approx 0,95$ м.

Дверные проемы подъездов:

стандартная ширина 1,2–1,4 м;

высота 2,0–2,2 м.

Для удобства просмотра данных ИИ выдает представленную ниже сводную таблицу результатов вычислений, что упрощает процесс поиска и уменьшает временные затраты:

Серия дома	1-447С-54
Количество этажей	5
Длина дома	48,0 м
Ширина дома	12,0 м
Высота дома	14 м
Размер оконных проемов	$1,2 \times 1,3$ м
Балкон (ширина $\times$ вынос)	$2,5 \times 0,95$ м
Дверные проемы подъездов	$1,2\text{--}1,4 \times 2,0\text{--}2,2$ м

Стандарты проемов и этажности подтверждаются визуально и типовой планировкой.

Определенные ИИ размерные параметры здания также верны. Рассмотренное применение ИИ более целесообразно для проведения различного вида фасадных работ, в том числе при облицовке здания вентиляционным фасадом. Полученные данные могут быть использованы как для расчета количества требуемых строительных материалов, так и для их подбора и расположения на фасаде. Поскольку при таких работах размеры требуются с точностью до миллиметра, то и начальные данные, предоставляемые ИИ, должны быть высокоточными [9, 10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ актуальной проблемы определения геометрических параметров зданий с использованием современных технологий ИИ и дистанционных данных показал, что применение ИИ эффективнее, чем использование традиционных методов, так как существенно влияет на повышение скорости обработки данных и получение геометрических параметров здания.

Особое внимание было уделено факторам, влияющим на качество анализа, включая разрешение снимков, освещенность, ракурс съемки и состояние фасадов. Демонстрационный пример на базе спутниковых изображений и фотоснимков подтвердил

возможность точного определения параметров панельных жилых домов, что доказывает практическую ценность метода для ремонтных работ, проводимых над фасадами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аманкулова Н.А., Молмакова М.С., Каримова Г.Т. Искусственный интеллект и геоинформационные системы // *Бюллетень науки и практики*. 2023. № 11. С. 278–287.
2. Слепушкин Д.В., Бурлов Д.Ю. Возможности искусственного интеллекта и автоматизации процессов проектирования в строительстве: библиометрический анализ // *Вестник МГСУ*. 2025. № 3. С. 440–455.
3. Сухарев О.С. Технологическое развитие: перспективы искусственного интеллекта // *Эргодизайн*. 2024. № 4. С. 424–434.
4. Шишкина Д.Н. Оценка экономической эффективности применения искусственного интеллекта в строительстве: выбор оптимального метода // *Вестник МГСУ*. 2024. № 9. С. 1550–1561.
5. Казарян К.К. Повышение эффективности использования компьютерного зрения // *Молодой исследователь Дона*. 2023. № 3 (42). С. 112–114.
6. Пользовательское соглашение сервисов «Яндекс». URL: <https://yandex.ru/legal/rules/ru/> (дата обращения: 08.01.2026).
7. Пользовательское соглашение «Jay Flow». URL: https://just-ai.com/docs/Jay_Flow_tos.pdf (дата обращения: 08.01.2026).
8. Колобова С.В. Обзор зарубежного и Московского опыта реновации городской застройки // *Вестник МГСУ*. 2023. № 5. С. 757–770.
9. Земляк В.Л., Глазунова Т.А. Организационно-технологические и конструктивные особенности реконструкции зданий 1950–1960-х годов // *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. 2024. № 1 (54). С. 50–57.
10. Жуков А.Д. Системы вентилируемых фасадов // *Строительство: наука и образование*. 2012. № 1. С. 3.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АНКУШИНА Светлана Константиновна – студентка, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sveta.ankushina@yandex.ru

КИСЕЛЕВ Алексей Дмитриевич – студент, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: alexbasketball31@gmail.com

ДВУЖИЛОВ Антон Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: anton_in_tver@mail.ru

СОКОЛОВ Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sokolov_project@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Анкушина С.К., Киселев А.Д., Двужилов А.С., Соколов С.А. Определение геометрических параметров объекта строительства при помощи использования технологий искусственного интеллекта // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2026. № 1 (29). С. 5–11.

**DETERMINATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF A CONSTRUCTION
OBJECT USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES**

S.K. Ankushina, A.D. Kiselyov, A.S. Dvuzhilov, S.A. Sokolov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article examines the methodology for determining the geometric parameters of construction objects. When using artificial intelligence technology, photos and satellite images are analyzed. The accuracy of determining the dimensions of panel residential buildings is evaluated. The key factors influencing the reliability of measurement results are determined. A method for processing spatial data using artificial intelligence has been proposed, which makes it possible to significantly reduce time costs and increase the objectivity of the results obtained. The practical significance of the work lies in the possibility of applying the developed methodology when planning housing repairs.

Keywords: artificial intelligence, determination of geometric parameters, construction sites, panel buildings, photographic images, satellite data, automated processing, repair work, technical inspection, computer technology.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

ANKUSHINA Svetlana Konstantinovna – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sveta.ankushina@yandex.ru

KISELYOV Alexey Dmitrievich – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: alexbasketball31@gmail.com

DVUZHILOV Anton Sergeyevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Resistance, Elasticity and Plasticity Theory, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: anton_in_tver@mail.ru

SOKOLOV Sergey Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sokolov_project@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Ankushina S.K., Kiselyov A.D., Dvuzhilov A.S., Sokolov S.A. Determination of geometric parameters of a construction object using artificial intelligence technologies // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2026. No. 1 (29), pp. 5–11.

УДК 691.587

**САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИЕСЯ ДЕКОРАТИВНЫЕ БЕТОНЫ
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАЛЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ***Н.А. Белов, Ю.Ю. Курятников, В.В. Белов**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Белов Н.А., Курятников Ю.Ю., Белов В.В., 2026

Аннотация. Рассмотрено использование самовосстанавливающегося декоративного бетона для предотвращения появлений трещин, а также усиления стойкости материала к различным природным и техногенным факторам. Определены составы бетона, который включает в себя белый портландцемент, песок средней крупности, высокоактивный метакраин, расширяющую сульфокраинатную добавку, молотый гранулированный доменный шлак, а также суперпластификатор. Отмечено, что оценка процесса самозалечивания трещин на поверхности бетона осуществляется визуальным методом, а также с использованием косвенной характеристики самовосстановления – коэффициента трещиностойкости. Исследование направлено на усиление природного потенциала к самовосстановлению (аутогенный механизм) с помощью специальных добавок, обладающих пуццолановой активностью. Приведены комплексные характеристики готового изделия, а также результаты эксперимента по наблюдению за затягиванием трещины на поверхности бетона.

Ключевые слова: самовосстановление бетона, декоративный бетон, молотый шлак, высокоактивный метакраин, суперпластификатор, коэффициент трещиностойкости, аутогенный механизм.

DOI: 10.46573/2658-7459-2026-1-12-20**ВВЕДЕНИЕ**

Образование трещин в бетонных и железобетонных конструкциях на протяжении их жизненного цикла неизбежно, в связи с чем постоянная необходимость ремонта существенно влияет на общую стоимость строительства и обслуживания [1, 2].

Использование декоративных бетонов с самовосстанавливающимися свойствами при производстве объектов облагораживания и обустройства городских территорий представляет собой один из способов повышения качества городских пространств, поскольку может продлить срок службы изделия и сэкономить затраты в будущем.

К возможным причинам самовосстановления бетона относятся образование карбоната или гидроксида кальция, осаждение частиц, продолжающаяся гидратация, набухание цементной матрицы [3, 4]. Обычная и дождевая вода при реакции с бетоном и углекислым газом в атмосфере способствует образованию карбоната кальция в бетоне, который залечивает трещины на поверхности бетона [3].

Ученые, исследовавшие процесс самовосстановления бетона, выделили два основных механизма самозалечивания трещин [1–7]:

1. Аутогенный (автономный), который реализуется без введения в состав бетона биологических добавок и обусловлен дальнейшей гидратацией негидратировавших

цементных частиц (клинкерный фонд), пуццолановой реакцией материалов и насыщением гидрооксида кальция [1–4].

2. Биологический, осуществляемый по такому принципу: лактат кальция вместе с бактериями помещается в капсулы из биоразлагаемого пластика диаметром 2–4 мм, которые с помощью химически активных добавок внедряются в бетонную смесь. При нормальных условиях использования капсулы сохраняют свою целостность, и бактерии находятся в состоянии анабиоза. Однако при появлении микротрещин структура капсул нарушается, что приводит к проникновению внутрь них влаги и выводит бактерии из анабиоза, активируя их; затем наступает быстрый рост численности бактерий, потребляющих кальций лактата. Выделяемый бактериями в процессе их жизнедеятельности известняк заполняет микротрещины [5–7].

Согласно работам [1–4], наиболее эффективным механизмом самовосстановления является аутогенный, обусловленный пуццолановой реакцией минеральных и кристаллических добавок. Постоянная гидратация минеральных добавок способствует аутогенному восстановлению, поскольку большая часть этих добавок (например, молотый доменный шлак) остается негидратированной даже в позднем возрасте.

Среди таких добавок можно выделить молотый гранулированный доменный шлак и высокоактивный метакраолин (ВМК).

Введение шлака в состав позволяет повысить стойкость бетона к образованию трещин, снизить коэффициент теплопроводности и увеличить устойчивость к агрессивным средам. Результатами исследований и практикой убедительно доказано, что бетоны на цементах, содержащих молотый гранулированный доменный шлак в количестве от 20 до 60 %, имеют существенные экономические, экологические, технологические и эксплуатационные преимущества перед бетонами на портландцементе без минеральных добавок [8, 9].

Высокоактивный метакраолин применяется в составе бетона для усиления (уплотнения) структуры [10]. Это гидравлически активная добавка, способная при взаимодействии с гидроксидом кальция образовывать нерастворимые низкоосновные гидроалюмосиликаты кальция [11, 12]. Кроме того, ВМК является кристаллической добавкой – чрезвычайно гидрофильным продуктом, созданным с помощью «активных химических веществ», который часто смешивают с цементом и песком. В присутствии воды они вступают в реакцию, образуя нерастворимые в воде осадки, которые блокируют поры и трещины и повышают плотность CSH и устойчивость к проникновению воды [2, 12].

Оценить процесс самозалечивания трещин на поверхности бетона можно визуальным методом [6], а также с использованием косвенной характеристики самовосстановления – коэффициента трещиностойкости [13, 14].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Были изучены возможности получения самовосстанавливающегося декоративного бетона с использованием отходов металлургической промышленности (молотого гранулированного доменного шлака), кристаллической добавки (ВМК) и сульфаталюминатной добавки. Для этого были изготовлены образцы-балочки и кубы для определения предела прочности при изгибе и сжатии в водонасыщенном и естественном состоянии.

Использовались следующие компоненты: белый портландцемент ПЦБ 1-500-Д0 (Семix); песок средней крупности с модулем крупности 2,38; суперпластификатор «Технониколь RM-304»; сульфаталюминатная расширяющая добавка РД-Н с удельной

поверхностью 350 м²/кг; высокоактивный метакраин ВМК-45 с удельной поверхностью 1 700 м²/кг и насыпной плотностью 480 кг/м³.

Материалы, взвешенные с учетом заранее рассчитанного состава бетонной смеси, засыпались поочередно и в течение 2 мин перемешивались лопаткой, после чего затворялись водой.

Контроль и корректировка полученной смеси осуществлялись при помощи «малого» конуса по величине расплыва, которая должна была составлять 160–180 мм (±5 мм). В случае отклонения от заданного диапазона проводилась корректировка состава: при недостаточном расплыве дополнительно вводилось 5 % воды и цемента с малым количеством суперпластификатора; при чрезмерном расплыве увеличивалась доля песка.

Скорректированная смесь послойно укладывалась в подготовленные формы размером 4,0 × 4,0 × 16,0 см и формы размером 7,0 × 7,0 × 7,0 см с уплотнением каждого слоя металлической штыковкой. Окончательное уплотнение производилось на вибростеле до появления цементного молока на поверхности. После виброуплотнения формы накрывались пленкой и выдерживались в течение 24 ч.

Спустя сутки производилось взвешивание форм с последующей распалубкой. Бетонные образцы-балочки выдерживались в нормальных условиях (температура 18–22 °С, относительная влажность воздуха 95 ± 2 %) в течение 28 сут.

Метод определения коэффициента трещиностойкости, рассматриваемого в качестве косвенного показателя способности материала к самовосстановлению, основан на проведении испытаний образцов на растяжение при изгибе в двух состояниях: нормальном (воздушно-сухом) и водонасыщенном. Критерием оценки выступает отношение полученных значений пределов прочности, фиксируемое в ходе эксперимента [13].

Расчет коэффициента трещиностойкости выполняется по формуле

$$K_{\text{трещ}} = R_{\text{изг. вод}} / R_{\text{изг.}},$$

где $R_{\text{изг. вод}}$ – предел прочности на растяжение при изгибе в водонасыщенном состоянии, МПа; $R_{\text{изг.}}$ – предел прочности на растяжение при изгибе в естественном состоянии, МПа.

Возрастание численного значения данного коэффициента свидетельствует о повышении интенсивности процессов самовосстановления структуры материала.

Определение коэффициента размягчения предполагает проведение испытаний на сжатие бетонных образцов, также находящихся в естественном и водонасыщенном состоянии. Искомый показатель вычисляется как отношение соответствующих пределов прочности при сжатии.

Коэффициент размягчения рассчитывается по формуле

$$K_{\text{разм}} = R_{\text{сж. вод}} / R_{\text{сж.}},$$

где $R_{\text{сж. вод}}$ – предел прочности на растяжение при изгибе в водонасыщенном состоянии, МПа; $R_{\text{сж.}}$ – предел прочности на растяжение при изгибе в естественном состоянии, МПа.

Данный коэффициент количественно характеризует водостойкость материала, отражая степень сохранения прочностных свойств при водонасыщении.

Экспериментальная оценка способности мелкозернистого бетона к самовосстановлению на основе визуального анализа выполнялась на образцах кубической формы размером 10 × 10 × 10 см. Состав исследуемых образцов соответствовал составу,

продемонстрировавшему максимальное значение коэффициента трещиностойкости по результатам предварительных испытаний. Твердение образцов осуществлялось в условиях тепловлажностной обработки на протяжении 28 сут.

По завершении периода твердения образцы подвергались нагружению с использованием гидравлического пресса с целью образования трещин раскрытием до 0,2 мм. Величину нагрузки подбирали экспериментально, ориентируясь на момент визуального обнаружения первых трещин. Фиксированная ширина трещин измерялась щупом (в соответствии с ГОСТ 882) в зоне их максимального раскрытия, после чего участки образования трещин маркировались.

Затем образцы помещались в водную среду, где выдерживались в стационарных условиях. С периодичностью 7 сут проводилось контрольное измерение ширины предварительно отмеченных трещин. Регистрация динамики изменения раскрытия трещин продолжалась до момента их полного зарастания (самозалечивания).

Критерием оптимальности состава являлась продолжительность периода заживления, составляющая от 28 до 56 сут. Составы, обеспечивающие заживление трещин в указанном временном интервале, рассматривались как обладающие наиболее выраженной способностью к самовосстановлению [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оптимальный состав самовосстанавливающегося бетона включает следующие компоненты (расход, кг): цемент (539); ВМК-45 (66,4); РД-Н (66,4); песок (1 675); RM-304 (4,7); вода (269).

На основании результатов проведенных исследований был установлен комплекс характеристик оптимального состава самовосстанавливающегося декоративного бетона:

средняя и истинная плотность, кг/м³;

предел прочности при сжатии и растяжении при изгибе, МПа;

водопоглощение по массе и объему, %;

параметры пористости (открытая, закрытая и полная), %;

коэффициент размягчения (водостойкость);

коэффициент конструктивного качества (ККК);

коэффициент трещиностойкости.

Комплексные характеристики изделия представлены ниже:

Характеристика	Значение
Механические свойства	
Предел прочности при изгибе в возрасте 28 сут, МПа	6,5
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 сут, МПа	39,15
Класс по прочности	B30
Плотность и водопоглощение	
Средняя плотность, г/см ³	2,08
Истинная плотность, г/см ³	2,36
Водопоглощение по массе, %	5,1
Водопоглощение по объему, %	10,6
Пористость, см ³	

Характеристика	Значение
Открытая	10,6
Полная	11,86
Закрытая	1,26
Коэффициенты	
Трещиностойкости	1,18
Размягчения	1,14
Конструктивного качества	21,23

Полученный бетон характеризуется средней плотностью 2 080 кг/м³, что соответствует тяжелым мелкозернистым бетонам. Истинная плотность составляет 2 360 кг/м³. Класс прочности на сжатие В30 (средняя прочность 39,15 МПа) достаточен для элементов МАФ. Прочность на растяжение при изгибе (6,5 МПа) находится на удовлетворительном уровне для материалов, работающих на изгиб.

Полная пористость материала составила 11,86 % с преобладанием открытой пористости (10,6 %). Водопоглощение по массе (5,1 %) и объему (10,6 %) типично для плотных цементных композитов. Критически важным является значение коэффициента размягчения, равное 1,14. Коэффициент, превышающий единицу, указывает на то, что водонасыщение не приводит к снижению прочности при сжатии, а в данном случае даже несколько ее увеличивает. Это показывает высокую водо- и морозостойкость материала, что крайне важно для бетона, эксплуатируемого в во влажных условиях.

При сравнении предела прочности в естественном и водонасыщенном состоянии можно увидеть, что последний увеличивается, поскольку в составе бетона присутствует ВМК. Ключевым механизмом при этом выступает активизация пуццолановой активности метаксаолина в условиях избыточного водонасыщения. Метаксаолин, как высокодисперсный аморфный алюмосиликат, вступает во вторичную реакцию с портландцементным гидроксидом кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). В водонасыщенной среде кинетика и полнота данной реакции существенно возрастают, что приводит к интенсивному дополнительному синтезу низкоосновных гидросиликатов кальция (C-S-H геля). Отложение новообразованной гидратной фазы в межзерновом пространстве и капиллярных порах обеспечивает доуплотнение микроструктуры на субмикроскопическом уровне.

В свою очередь, избыток влаги способствует более полной и продолжительной гидратации как клинкерных минералов цемента, так и компонентов расширяющей добавки (РД-Н). Это приводит к оптимизации капиллярно-гелевой структуры цементного камня, а именно: к снижению объемов крупных капиллярных пор и увеличению доли мелких гелевых [12].

Рассмотренное явление свидетельствует о высокой потенциальной долговечности материала в условиях эксплуатации с переменным влажностным режимом. Контакт с водой в данном случае не инициирует процессы разрушения, а напротив, способствует обеспечению структурной целостности матрицы, что является ценным эксплуатационным преимуществом для малых архитектурных форм.

Коэффициент трещиностойкости, определенный в возрасте 28 сут, составил 1,18. Значение, стабильно превышающее 1,0, подтверждает выводы, сделанные на первом этапе. Оно указывает на формирование особо плотной и однородной микроструктуры цементного камня, в которой процессы упрочнения в водной среде (догидратация,

пуццолановая реакция) преобладают над негативным воздействием воды. Такая структура обладает повышенной сопротивляемостью зарождению и развитию трещин, а также создает предпосылки для автогенного залечивания микротрещин за счет продолжения процессов гидратации и карбонизации в зоне их образования.

Высокий коэффициент конструктивного качества ($K_{KK} = 21,23$) подтверждает рациональность подобранного состава, демонстрируя хорошее соотношение прочности и плотности.

Экспериментальным путем разработан и комплексно охарактеризован состав самовосстанавливающегося декоративного бетона на основе белого цемента. Введение комплекса модифицирующих добавок (ВМК и сульфоалюминатной расширяющей добавки) позволило целенаправленно сформировать плотную, химически стабильную микроструктуру с минимальным количеством слабых звеньев, таких как портландит и макропоры. Это обеспечило материалу не только достаточные прочностные и декоративные свойства, но и повышенные эксплуатационные характеристики: высокую водостойкость ($K_{разм} = 1,14$) и трещиностойкость ($K_{трещ} = 1,18$). Последняя служит фундаментальной основой для проявления эффекта самовосстановления микротрещин в условиях эксплуатации. Полученный бетон соответствует целевым показателям для применения в производстве долговечных и надежных малых архитектурных форм.

Визуальная оценка процесса залечивания трещины на поверхности бетона проводилась на образцах, содержащих в своем составе ВМК-45 и РД-Н в количестве 10 % от массы цемента. Данный состав был определен на основе коэффициента трещиностойкости – косвенной характеристики самовосстановления. Исследовались стандартные образцы-кубы размером 7,0 x 7,0 x 7,0 см. Процесс залечивания трещин на поверхности бетона показан на рис. 2.

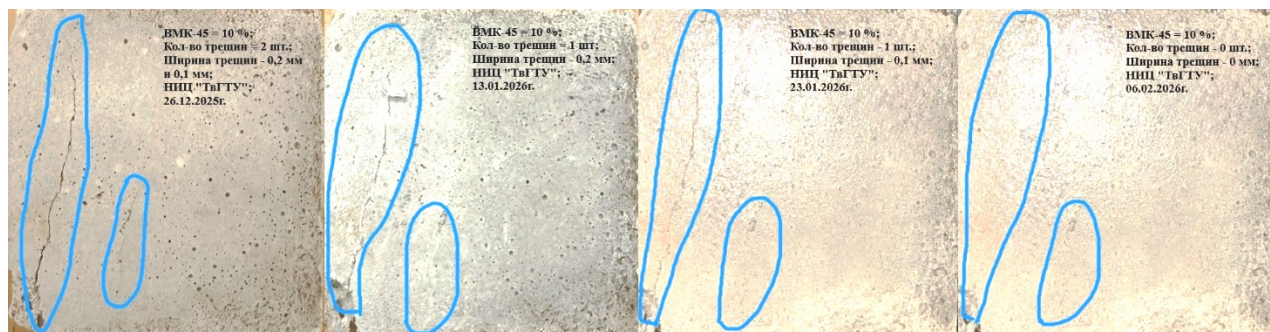


Рис. 2. Процесс самовосстановления бетона

На рисунке видно, что результат достигается постепенно: сначала исчезают мелкие трещины шириной до 0,1 мм включительно, а затем и большие. На втором этапе наблюдается образование белого налета извести. Проверка показала, что при формировании налет не смывается водой, однако на последующих этапах он полностью исчезает самостоятельно. Этот факт подтверждает, что налет является временным побочным продуктом реакции и не влияет на конечный результат. Следовательно, подобранный состав полностью работоспособен, а наблюдаемый процесс готов к дальнейшей доработке и применению.

ВЫВОДЫ

Экспериментальным путем успешно разработан состав самовосстанавливающегося декоративного бетона, предназначенного для производства малых архитектурных форм. Ключевыми компонентами, обеспечившими специальные свойства, стали белый портландцемент, ВМК-45 и сульфоалюминатная расширяющая добавка (РД-Н).

Основой для проявления аутогенного самовосстановления (залечивания микротрещин) служит целенаправленно созданная микроструктура цементного камня.

Визуальная оценка процесса самовосстановления продемонстрировала присущую материалу способность к залечиванию искусственно созданных трещин шириной до 0,2 мм в условиях повышенной влажности. При этом временное образование известкового налета является побочным продуктом реакций и не ухудшает конечный результат.

Применение разработанного бетона при производстве малых архитектурных форм позволит: увеличить долговечность изделий за счет снижения скорости деградации от влаги и микротрещин, сократить будущие эксплуатационные расходы на ремонт и замену элементов городского благоустройства, а также повысить эстетическую привлекательность объектов благодаря сохранению целостности их декоративной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahn T.H., Kishi T. Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Miner Admixtures // *JACT*. 2020, No. 8 (2), pp. 171–186.
2. A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures / N.De Belie [et al.] // *Advanced Materials Interfaces*. 2018. No. 5 (17), pp. 152–160.
3. Асонова А.В. Новый взгляд на бетон. Самовосстанавливающийся гибкий бетон. IX Всероссийский фестиваль науки: Сборник докладов: в 2 т. Нижний Новгород, 23–24 октября 2019 года. Т. 1. Н. Новгород: НГАСУ, 2020. С. 16–18.
4. Addressing Infrastructure Durability and Sustainability by Self Healing Mechanisms – Recent Advances in Self Healing Concrete and Asphalt / E. Schlangen, S. Sangadji // *Procedia Engineering. The 2nd International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering (ICRMCE)*. 2018, pp. 39–57.
5. Кулешова П.Н. Умные материалы: самовосстанавливающийся бетон, стекла с изменяемой прозрачностью // *Научный журнал молодых ученых*. 2025. № 4 (44).
6. Курятников Ю.Ю. Разработка самовосстанавливающегося бетона // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 4 (28). С. 17–23.
7. Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete / T. Sharma [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2018. No. 160, pp. 610–619.
8. Джаббарова Н.Э., Асадова И.Б.К. Изучение прочности шлакоцемента и бетонов на его основе // *Наука и образование сегодня*. 2021. № 7 (66).
9. Иванов И.М., Крамар Л.Я., Мордовцева М.В. Цементы и бетоны с использованием молотого гранулированного доменного шлака // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура*. 2024. № 3. С. 33–48.
10. Казанская Л.Ф., Сметанин А.А. Механические характеристики реставрационных растворов при использовании в их составах метакаолинов // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2023. № 4. С. 853–859.

11. Чихиро Д.А. Влияние метакеолина на физико-механические свойства цементного камня // *Наука, техника и образование*. 2021. № 5 (80). С. 31–34.
12. Красиникова Н.М., Степанов С.В., Искандарова А.Ф. Исследование влияния метакеолина на прочность бетона // *Инновационная наука*. 2023. № 7-1. С. 41–43.
13. Белов В.В., Куляев П.В. Принципы проектирования мелкозернистых карбонатных бетонов повышенной трещиностойкости // *Строительные материалы*. 2017. № 7. С. 44–47.
14. Жабборов А.Р. Прочностные характеристики конструкций из дисперсно-армированных бетонов с учетом нелинейности деформирования // *Экономика и социум*. 2025. № 2-2 (129). С. 294–297.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЛОВ Никита Александрович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: nikitka-belov-2001@bk.ru

КУРЯТНИКОВ Юрий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов Н.А., Курятников Ю.Ю., Белов В.В. Самовосстанавливающиеся декоративные бетоны для изготовления малых архитектурных форм // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2026. № 1 (29). С. 12–20.

SELF-HEALING DECORATIVE CONCRETES FOR THE MANUFACTURE OF SMALL ARCHITECTURAL FORMS

N.A. Belov, Yu.Yu. Kuryatnikov, V.V. Belov

Abstract. The use of self-healing decorative concrete to prevent the appearance of cracks and to increase the material's resistance to various natural and man-made factors is considered. The compositions of concrete, which include white Portland cement, medium-grained sand, highly active metakaolin, an expanding sulfoaluminate additive, ground granulated blast furnace slag, and a superplasticizer, are determined. It is noted that the assessment of the self-healing process of cracks on the surface of concrete is carried out using a visual method, as well as using an indirect characteristic of self-healing, such as the coefficient of crack resistance. The study aims to enhance the natural potential for self-healing (autogenic mechanism) using special additives with pozzolanic activity. The article presents comprehensive characteristics of the finished product, as well as the results of an experiment on observing the healing of cracks on the surface of concrete.

Keywords: self-healing of concrete, decorative concrete, ground slag, highly active methacolin, superplasticizer, crack resistance coefficient, autogenic mechanism.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BELOV Nikita Aleksandrovich – Graduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: nikitka-belov-2001@bk.ru

KURYATNIKOV Yury Yuryevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

BELOV Vladimir Vladimirovich – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov N.A., Kuryatnikov Yu.Yu., Belov V.V. Self-healing decorative concretes for the manufacture of small architectural forms // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2026. No. 1 (29), pp. 12–20.

УДК 665.775

ОЦЕНКА СТРУКТУРНО-ГРУППОВОГО СОСТАВА БИТУМОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ РЕЗИНОВОЙ КРОШКОЙ, МЕТОДОМ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ

Ю.Е. Кабанов, С.А. Иванов, И.С. Гуркин

*Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
(г. Кемерово)*

© Кабанов Ю.Е., Иванов С.А., Гуркин И.С., 2026

Аннотация. Приведены результаты сравнительного исследования структурно-группового состава битума марки БНД 70/100, модифицированного резиновой крошкой по одностадийной и двухстадийной технологиям. Исследование выполнено методом инфракрасной (ИК) спектроскопии на сканирующем электронном микроскопе JSM 6480 LV. Установлено, что базовая углеводородная матрица битума сохраняется при модификации, о чем свидетельствуют характерные полосы поглощения в областях $2\,750\text{--}2\,900$, $790\text{--}910$ и $1\,600\text{ см}^{-1}$. Критерием успешного введения резинового модификатора служит появление новых полос поглощения в интервалах $1\,950\text{--}2\,190$ и $2\,200\text{--}2\,300\text{ см}^{-1}$, что коррелирует с присутствием в системе соединений каучуковой природы. Усиление полосы при $1\,590\text{ см}^{-1}$ указывает на увеличение содержания высокомолекулярных асфальтенов и структурирующих смол в модифицированных битумах. Качественных различий в ИК-спектрах образцов, полученных по разным технологиям, не выявлено.

Ключевые слова: битум, резиновая крошка, модификация, инфракрасная спектроскопия, структурно-групповой состав, асфальтены, каучуковые соединения, ИК-спектр.

DOI: 10.46573/2658-7459-2026-1-20-25

ВВЕДЕНИЕ

Нефтяные дорожные битумы представляют собой сложные коллоидные системы, состоящие из высокомолекулярных углеводородов различных рядов и их гетероатомных производных. Для улучшения их эксплуатационных характеристик, таких как теплоустойчивость, эластичность, трещиностойкость и долговечность, широко применяется модификация полимерными добавками [1, 2]. Одним из наиболее перспективных и экологически целесообразных модификаторов является резиновая крошка из изношенных автомобильных шин, использование которой решает проблему утилизации отходов [3, 4].

Эффективность модификации битума резиной в значительной степени зависит от глубины физико-химического взаимодействия компонентов, что, в свою очередь, определяется технологией введения модификатора. Наиболее распространены одностадийный (прямое смешение всех компонентов) и двухстадийный (предварительная активация или пластификация резины) технологические процессы. Актуальной задачей является оценка влияния применяемой технологии на структурно-групповой состав и, как следствие, на свойства получаемого резинобитумного вяжущего (РБВ) [5]. Инфракрасная (ИК) спектроскопия – один из наиболее информативных методов решения такой задачи, позволяющий идентифицировать функциональные группы и типы химических связей в сложных органических системах.

Цель данной работы заключалась в сравнительном исследовании структурно-группового состава битума БНД 70/100, модифицированного резиновой крошкой по одностадийной и двухстадийной технологиям, методом ИК-спектроскопии для выявления особенностей взаимодействия компонентов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования использовали дорожный битум марки БНД 70/100. Модификатором служила резиновая крошка из изношенных автомобильных шин с размером частиц 0,1–0,5 мм. В качестве пластифицирующего компонента применяли масло-пластификатор ПН-6Ш. Были приготовлены следующие образцы:

1. Исходный битум БНД 70/100 (контрольный образец).
2. Битумное вяжущее, модифицированное резиновой крошкой по двухстадийной технологии (предварительная обработка крошки в пластификаторе с последующим смешением с битумом).
3. Битумное вяжущее, модифицированное резиновой крошкой по одностадийной технологии (одновременное смешение всех компонентов).

ИК-спектры образцов снимали на сканирующем электронном микроскопе JSM 6480 LV, оборудованном модулем для ИК-Фурье спектроскопии в режиме нарушенного полного внутреннего отражения. Спектры регистрировали в диапазоне $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$ с разрешением 4 см^{-1} , накоплением 32 скана. Для сравнения также был записан спектр масла-пластификатора ПН-6Ш. Обработку и анализ спектров проводили с использованием специализированного программного обеспечения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлены ИК-спектры исходного битума, масла-пластификатора и битумов, модифицированных резиновой крошкой по различным технологиям. Визуальный анализ спектров подтверждает их качественное сходство в основных характеристических областях, что указывает на сохранение фундаментальной углеводородной матрицы битума БНД 70/100 после модификации [2, 6].

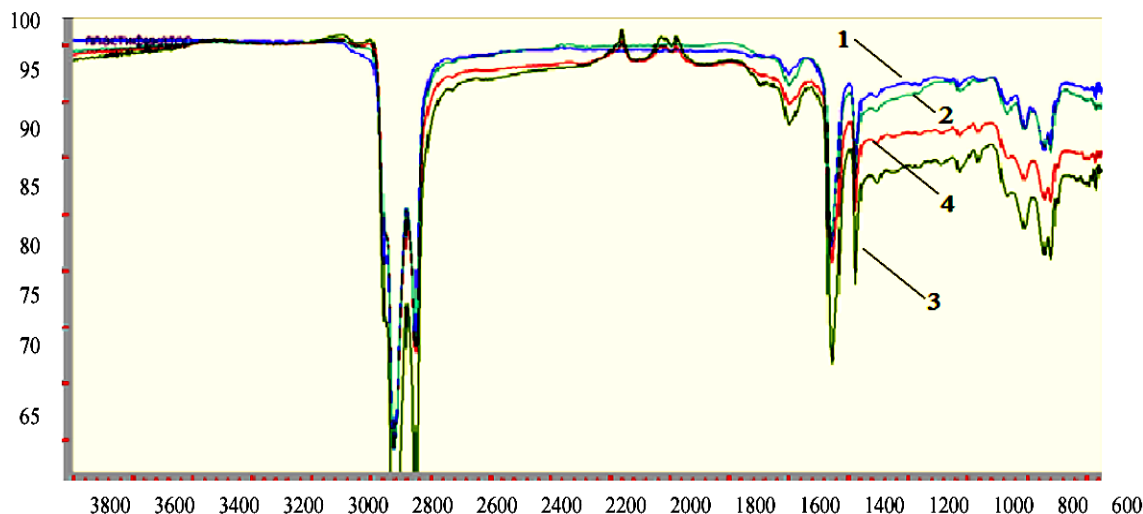


Рис. 1. ИК-спектры исследуемых битумных вяжущих:

- 1 – масла-пластификатора ПН-6Ш;
- 2 – исходного битума марки БНД 70/100;
- 3 – битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе;
- 4 – битума, модифицированного резиновой крошкой при одностадийном технологическом процессе

Анализ спектров выявил следующие характерные полосы поглощения и их изменения:

1. Область валентных колебаний С–Н связей ($2\,750\text{--}2\,900\text{ см}^{-1}$). Все битумные образцы (2, 3, 4) демонстрируют интенсивные дублеты в указанном диапазоне, характерные для асимметричных и симметричных колебаний связей CH_2 и CH_3 в алифатических цепях насыщенных углеводородов, парафинов и масел. Интенсивность этих полос для исходного и модифицированных битумов практически идентична.

2. Область колебаний ароматических структур ($790\text{--}910\text{ см}^{-1}$). В спектрах битумных образцов наблюдаются слабые полосы в этом интервале, что соответствует колебаниям С–Н связей в ароматических кольцах и подтверждает наличие ароматических структур.

3. Область колебаний $\text{C}=\text{C}$ связей ($\sim 1\,600\text{ см}^{-1}$). На всех спектрах битумов присутствует полоса при $\sim 1\,600\text{ см}^{-1}$, связанная с валентными колебаниями $\text{C}=\text{C}$ связей, как правило, циклического строения.

4. Область карбонильных групп ($\sim 1\,590\text{ см}^{-1}$). В спектрах модифицированных битумов (3, 4) наблюдается усиление полосы поглощения вблизи $1\,590\text{ см}^{-1}$ по сравнению с исходным битумом (2). Эта полоса соответствует валентным колебаниям карбонильных

групп ($\text{C}=\text{O}$) и указывает на увеличение содержания высокомолекулярных асфальтенов и структурирующих смол в модифицированных композициях, что согласуется с данными других исследований [4, 7].

5. Область поглощения каучуковых соединений ($1\,950\text{--}2\,300\text{ см}^{-1}$). Наиболее значимым отличием спектров модифицированных битумов (3, 4) от спектров исходных материалов (1, 2) является наличие полос поглощения в интервале $1\,950\text{--}2\,300\text{ см}^{-1}$. Данные полосы отсутствуют в спектрах чистого битума и пластификатора. Появление поглощения в этом диапазоне, в частности в интервале $2\,200\text{--}2\,300\text{ см}^{-1}$, служит надежным индикатором присутствия в системе химических фрагментов каучуковой природы [5], что подтверждается ИК-спектром бутадиенового каучука ПДИ-1К, имеющим характерные пики в области $2\,200\text{--}2\,350\text{ см}^{-1}$ (рис. 2).

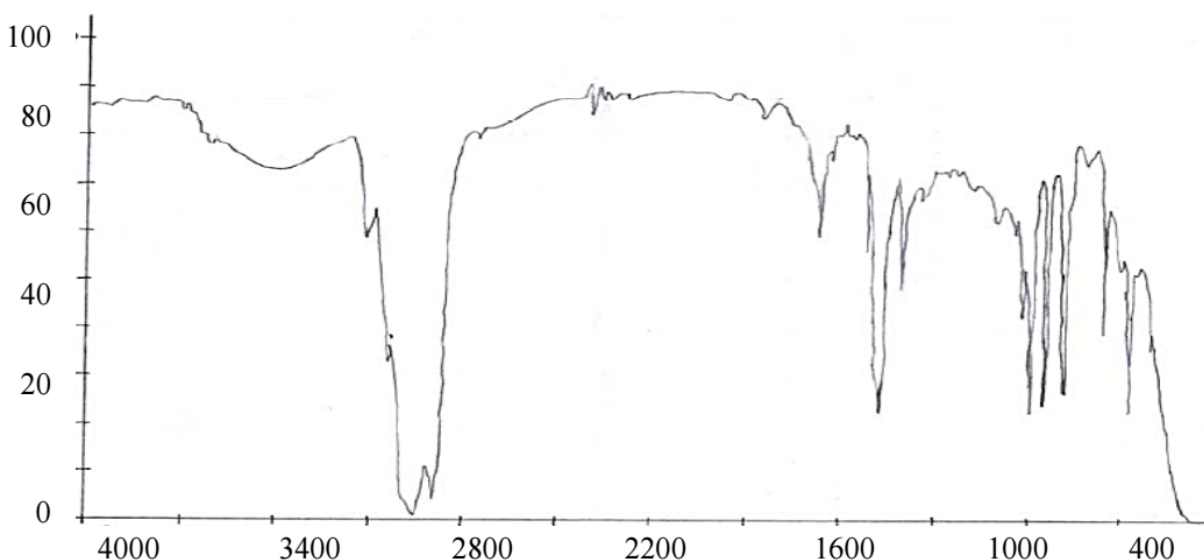


Рис. 2. ИК-спектр гидроксилсодержащего низкомолекулярного бутадиенового каучука ПДИ-1К

Сравнение спектров битумов, модифицированных по одностадийной (4) и двухстадийной (3) технологиям, показывает их высокую степень сходства. Основные различия, согласно рис. 1, носят количественный характер и могут проявляться в незначительных вариациях относительной интенсивности полос в области $1\,950\text{--}2\,300\text{ см}^{-1}$ и при $1\,590\text{ см}^{-1}$. Это позволяет сделать вывод, что обе технологии приводят к сходному типу химического взаимодействия между компонентами [6, 7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Метод ИК-спектроскопии подтвердил сохранение основной углеводородной структуры битума БНД 70/100 после его модификации резиновой крошкой, о чем свидетельствует неизменность набора характеристических полос поглощения в областях $2\,750\text{--}2\,900$, $790\text{--}910$ и $1\,600\text{ см}^{-1}$ [2].

2. Надежным спектральным маркером введения резинового модификатора в битумное вяжущее служит появление полос поглощения в интервале $1\,950\text{--}2\,300\text{ см}^{-1}$, которые отсутствуют в спектрах исходного битума и пластификатора. Особенно

показательна область $2\,200\text{--}2\,300\text{ см}^{-1}$, характерная для соединений каучуковой природы [5].

3. Усиление полосы поглощения вблизи $1\,590\text{ см}^{-1}$ в модифицированных образцах указывает на увеличение содержания высокомолекулярных асфальтенов и структурирующих смол, что свидетельствует о структурной перестройке битумной матрицы и может положительно влиять на реологические и эксплуатационные свойства материала [4, 7].

4. Сравнительный анализ ИК-спектров не выявил качественных различий в структурно-групповом составе битумов, модифицированных по одно- и двухстадийной технологиям. Наблюдаемые различия носят количественный характер, что свидетельствует о сходном характере взаимодействия компонентов при использовании данных технологических приемов [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольфсон С.И. Использование модифицированного дорожного битума в асфальтобетонах и щебеночно-мастичных асфальтобетонах // *Вестник технологического университета*. 2016. № 17. С. 37–40.
2. Модификация битумов, как способ повышения их эксплуатационных свойств / С.И. Вольфсон [и др.] // *Вестник технологического университета*. 2016. № 17. С. 29–33.
3. Аюпов Д.А., Мурафа А.В., Макаров Д.Б., Хакимуллин Ю.Н., Хозин В.Г. Наномодифицированные битумные вяжущие для асфальтобетона // *Жилищное строительство*. 2010. № 10. С. 34–35.
4. Минхаирова А.И., Закирова Л.Ю., Вольфсон И.С., Аюпов Д.А., Мурафа А.В., Хозин В.Г., Хакимуллин Ю.Н. Модификация дорожных битумов смесевыми термоэластопластами // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15. № 17. С. 120–122.
5. Мурафа А.В., Аюпов Д.А., Хозин В.Г. Битумно-резиновые вяжущие строительного назначения: учебное пособие. Казань: КГАСУ, 2012.
6. Пузакова Е.В., Закирова Л.Ю., Вольфсон И.С., Хакимуллин Ю.Н., Аюпов Д.А., Мурафа А.В., Хозин В.Г. Влияние состава термоэластопластов на свойства модифицированных битумов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т. 16. № 1. С. 120–121.
7. Makarov D., Ayupov D., Murafa A., Khozin V. Compatibility studies of mixed thermoplastic rubber with road bitumen // *Open Civil Engineering Journal*. 2014. Т. 8. № 1. С. 124–129.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАБАНОВ Юрий Евгеньевич – старший преподаватель кафедры автомобильных дорог и городского кадастра, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28. E-mail: kabanovjue@kuzstu.ru

ИВАНОВ Сергей Александрович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой автомобильных дорог и городского кадастра, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28. E-mail: isa.ad@kuzstu.ru

ГУРКИН Илья Сергеевич – студент, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28. E-mail: ilia2018gurkin@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Кабанов Ю.Е., Иванов С.А., Гуркин И.С. Оценка структурно-группового состава битумов, модифицированных резиновой крошкой, методом ИК-спектроскопии // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2026. № 1 (29). С. 20–25.

ASSESSMENT OF THE GROUP COMPOSITION OF RUBBER CRUMB MODIFIED BITUMEN BY INFRARED SPECTROSCOPY

Yu.E. Kabanov, S.A. Ivanov, I.S. Gurkin

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (Kemerovo)

Abstract. The paper presents the results of a comparative study of the group composition of BND 70/100 bitumen modified with rubber crumb using one-stage and two-stage technologies. The study was performed by infrared (IR) spectroscopy on a JSM 6480 LV scanning electron microscope. It was found that the basic hydrocarbon matrix of bitumen is preserved upon modification, as evidenced by characteristic absorption bands in the regions of 2 750–2 900, 790–910 and 1 600 cm^{-1} . The criterion for the successful introduction of a rubber modifier is the appearance of new absorption bands in the intervals of 1 950–2 190 cm^{-1} and 2 200–2 300 cm^{-1} , which correlates with the presence of rubber compounds in the system. The intensification of the band at 1590 cm^{-1} indicates an increase in the content of high-molecular-weight asphaltenes and structuring resins in modified bitumens. No qualitative differences were found in the IR spectra of samples obtained using different technologies.

Keywords: bitumen, rubber crumb, modification, infrared spectroscopy, group composition, asphaltenes, rubber compounds, IR spectrum.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KABANOV Yuriy Evgenievich – Senior Lecturer, Department of Highways and Urban Cadastre, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennaya str., Kemerovo, 650000, Russia. E-mail: kabanovjue@kuzstu.ru

IVANOV Sergey Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Highways and Urban Cadastre, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennaya str., Kemerovo, 650000, Russia. E-mail: isa.ad@kuzstu.ru

GURKIN Ilya Sergeevich – Student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennaya str., Kemerovo, 650000, Russia. E-mail: ilia2018gurkin@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kabanov Yu.E., Ivanov S.A., Gurkin I.S. Assessment of the group composition of rubber crumb modified bitumen by infrared spectroscopy // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2026. No. 1 (29), pp. 20–25.

УДК 624.151.5

**РАСЧЕТ И СРАВНЕНИЕ ОСАДОК ФУНДАМЕНТНОЙ ПЛИТЫ
ПО РАЗНЫМ МОДЕЛЯМ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ В СОВРЕМЕННОМ
ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ****С.Л. Субботин, А.Д. Крылов***Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Субботин С.Л., Крылов А.Д., 2026

Аннотация. В статье рассмотрен расчет и приведены результаты сравнения осадок фундаментной плиты 12-этажного монолитного жилого дома с помещениями общественного назначения по разным моделям грунтового основания.

Ключевые слова: грунтовое основание, осадка, модель Винклера, модель Пастернака, метод послойного суммирования.

DOI: 10.46573/2658-7459-2026-1-26-35**РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОСТЕЛИ В ПРОГРАММЕ-САТЕЛЛИТЕ**

В программно-вычислительном комплексе (ПВК) и программах-сателлитах реализована возможность расчета с одним и двумя коэффициентами постели. Существует несколько способов расчета коэффициентов постели C_1 и C_2 [1–12].

Фундамент под зданием выполнен монолитной фундаментной плитой толщиной 800 мм из бетона класса В25 (рис. 1) на естественном основании (рис. 2) с устройством подбетонки класса В7,5 толщиной 100 мм, превышающей габариты подошвы на 250 мм в каждую сторону. Естественное сложение грунтов основания под фундаментной плитой отображено на рис. 3.

Коэффициент постели задается в первом приближении $C_1 = 500 \text{ т/м}^3$, расчет включает несколько итераций. При этом ограничивается перемещение фундаментной плиты здания по направлениям X и Y . Линейный расчет выполняется методом PARFES.

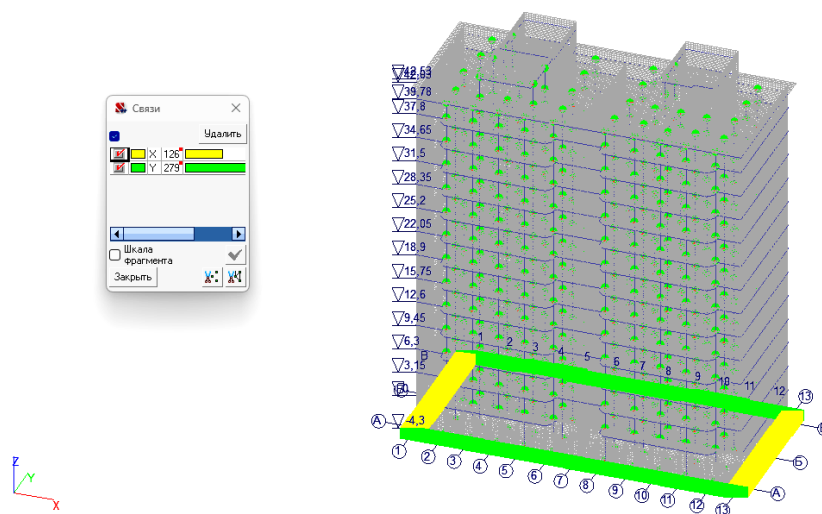


Рис. 1. Связи фундаментной плиты

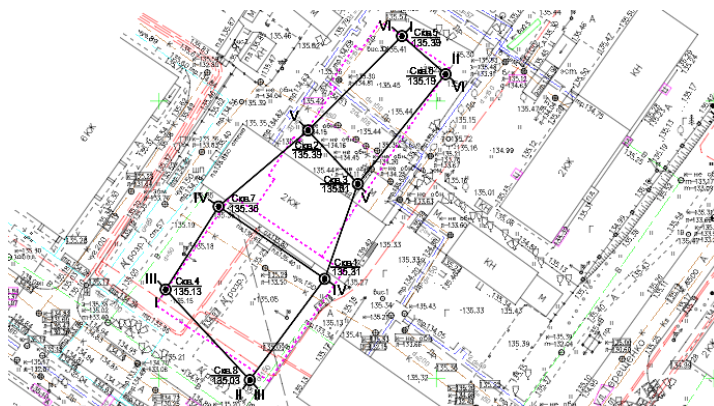


Рис. 2. Расположение скважин, секции № 1 и 2

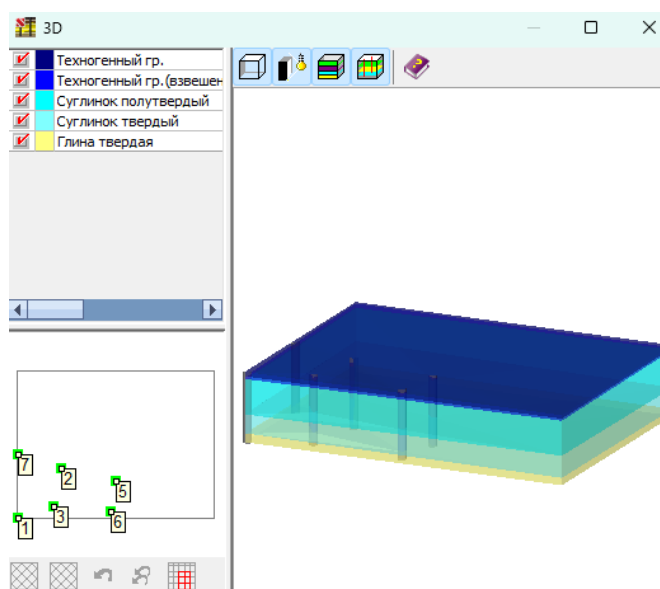


Рис. 3. Разрез 3D-слоев грунта

Согласно пункту 5.6.41 СП 22.13330.2016 нижнюю границу сжимаемой толщи основания принимают на глубине $z = H_c$, где выполняется условие

$$\sigma_{zp} = 0,5\sigma_{zg}.$$

При этом глубина сжимаемой толщи должна быть не менее $H_{\min}$, равной $(4 + 0,1b)$ при $10 < b \leq 60$ м, т. е.

$$\begin{aligned} E &\geq 7 \text{ МПа } \sigma_{zp} = 0,5\sigma_{zg}; \\ E &\leq 7 \text{ МПа } \sigma_{zp} = 0,2\sigma_{zg}. \end{aligned}$$

Так как в рассматриваемом случае модуль деформации грунта больше 7 МПа, то выбираем напряжение от внешней нагрузки с половиной напряжения от собственного веса грунта: $\sigma_{zp} = 0,5\sigma_{zg}$.

Значение высоты сжимаемой толщи определяется отношением $\sigma_{zp} / \sigma_{zg}$ в разделе настроек «Расчет». По умолчанию $\sigma_{zp} / \sigma_{zg}$ равно 0,2.

После нескольких итераций получается итоговый результат. Стабилизация величин C_1 наступает к 3-й итерации. Осадка фундаментной плиты представлена на рис. 4.

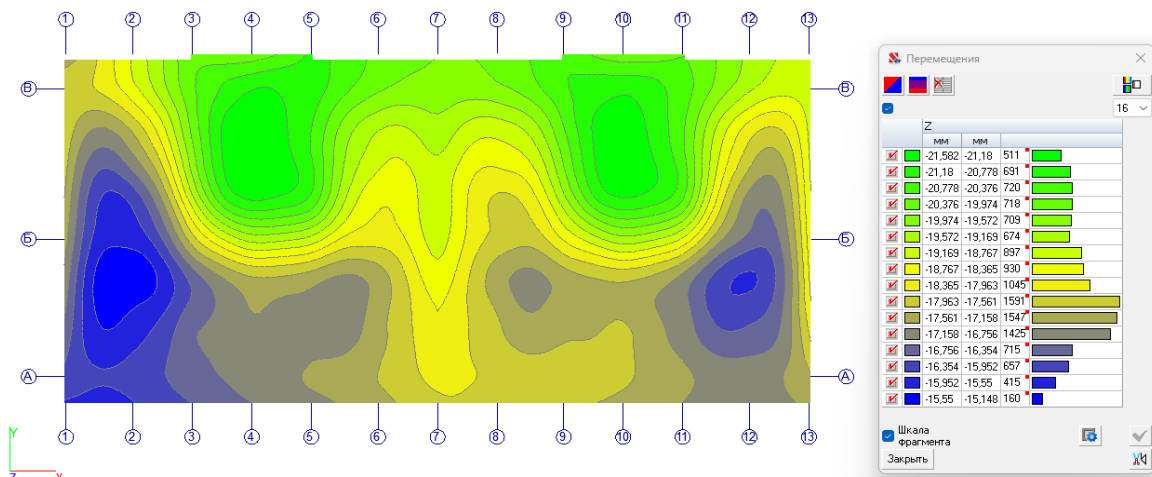


Рис. 4. Осадка фундаментной плиты из ПКВ, 3-я итерация

ПЕРЕСЧЕТ В ПРОГРАММЕ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОСТЕЛИ ПОСЛЕ ЗАНИЖЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ИЗ-ЗА ПОЯВЛЕНИЯ ТРЕЩИН В ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

При наличии трещин вводится понижающий коэффициент 0,2 для модуля упругости бетона. После этого производится перерасчет всей схемы, так как все усилия будут перераспределены. Если после изменения жесткостей плиты трещины начали расползаться или локализоваться, то создается группа для новых трещин и уже для них вводится понижающий коэффициент 0,2, а предыдущей группе трещин возвращается коэффициент 0,3. Перерасчет продолжается до тех пор, пока трещины не стабилизируются в расчетной схеме (рис. 5).

То же самое делается с плитами перекрытия, плитой покрытия и лестничными маршами.

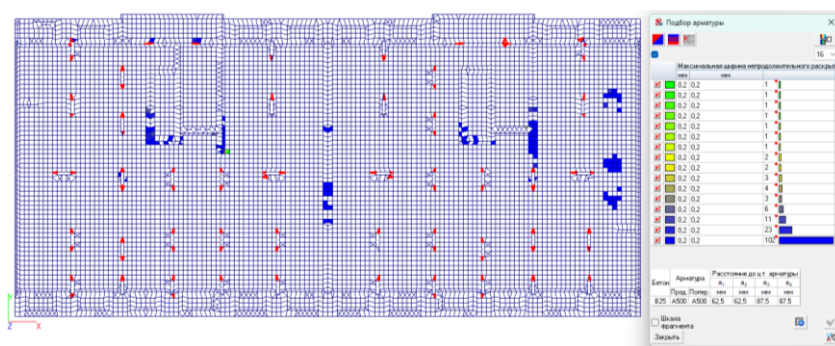


Рис. 5. Трещины фундаментной плиты на 9-й итерации

После нескольких итераций получается итоговый результат. Стабилизация величины C_1 наступает к 5-й итерации. Осадка фундаментной плиты представлена на рис. 6.

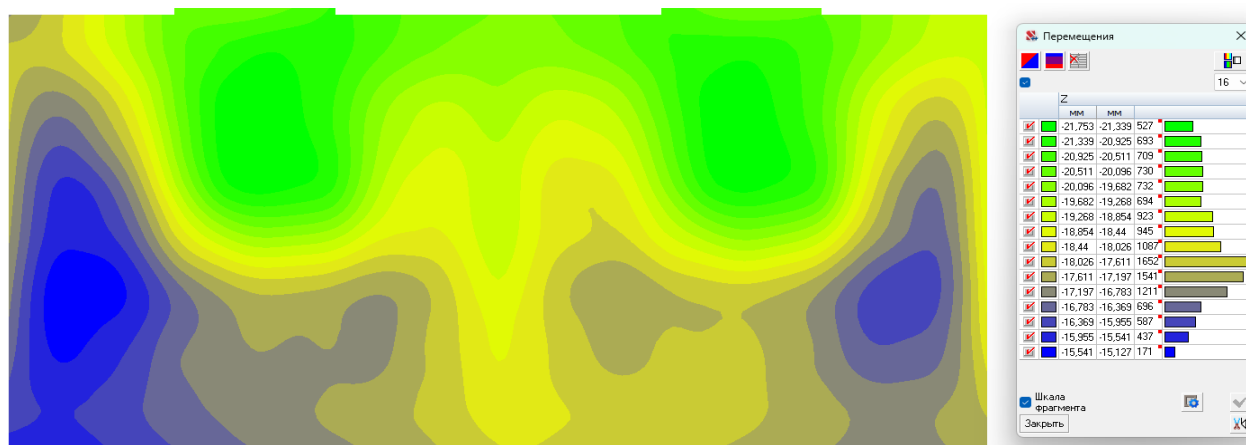


Рис. 6. Осадка фундаментной плиты из ПВК, 5-я итерация

РАСЧЕТ ПО МОДЕЛИ ПАСТЕРНАКА

Расчет коэффициентов C_1 и C_2 в программе-сателлите в составе ПВК представлен в табл. 1 [12].

Таблица 1

Определение коэффициентов постели в программе для расчета коэффициентов C_1 и C_2

Наименование грунтов	Модуль деформации, Т/м ²	Коэффициент Пуассона	Толщина слоя, м
Суглинок полутвердый	3 058,104	0,35	6,8
Суглинок твердый	4 383,282	0,35	4,34

Коэффициент сжатия C_1 – 499,401 Т/м³.

Коэффициент сдвига C_2 – 3 824,883 Т/м.

Важно отметить, что в графе «Толщина слоя» учитываются только слои грунта в пределах сжимаемой толщи [12].

Учет части основания, расположенной по внешней области Ω за внешним контуром фундаментной плиты, может выполняться с использованием «полубесконечных конечных элементов» типа «Клин» или «Полоса». Эти законтурные элементы позволяют смоделировать все окружение области фундаментной плиты, если она является выпуклой и многоугольной [12].

Многоугольность области практически всегда обеспечивается с той или иной степенью точности. Если же область Ω является невыпуклой, то она должна быть дополнена до выпуклой области конечными элементами ограниченных размеров. При этом в дополняемых частях толщина плиты принимается равной нулю (рис. 7) [12].

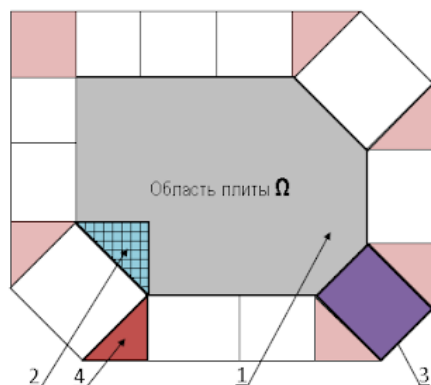


Рис. 7. Дополняемые части плиты: 1 – плита; 2 – дополнение области Ω до выпуклой; 3 – элемент «Полоса»; 4 – элемент «Клин»

Так как форма фундаментной плиты рассчитываемого здания является невыпуклой, то ее необходимо достроить до выпуклой для обеспечения возможности выполнения расчета по этой модели (рис. 8, 9).

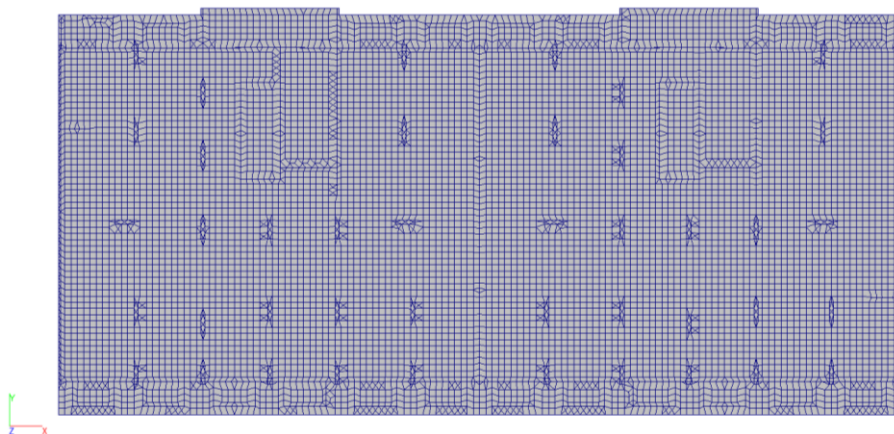


Рис. 8. Первоначальная форма плиты

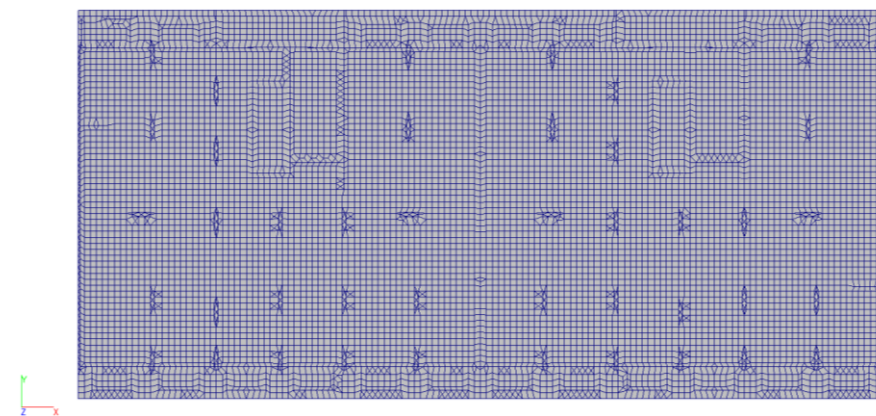


Рис. 9. Конечная форма плиты

Затем производится статический расчет схемы и в графическом анализе рассматриваются перемещения плиты по оси Z от нормативно-длительной комбинации нагрузжений (рис. 10).

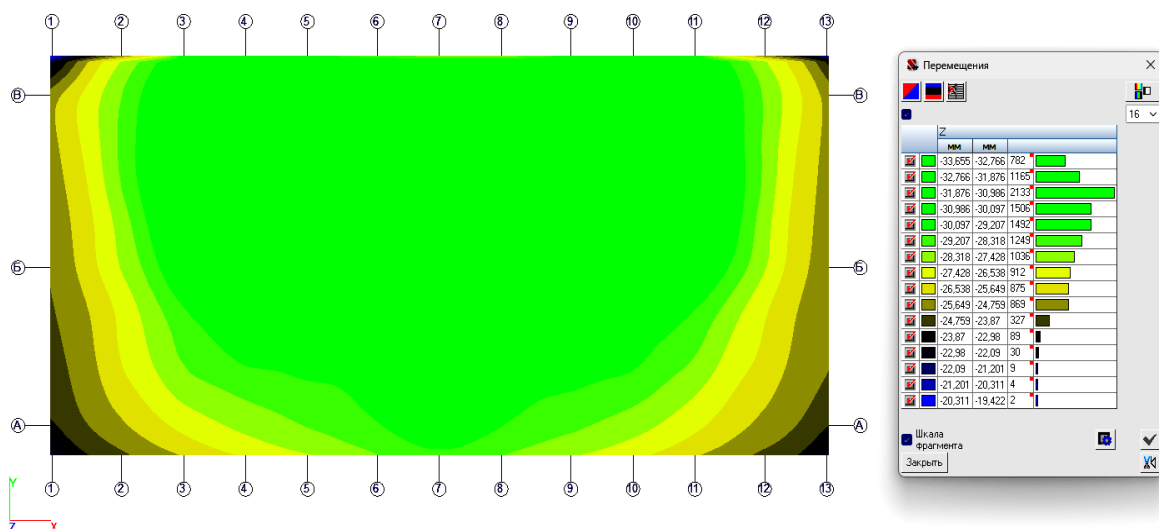


Рис. 10. Осадка фундаментной плиты по модели Пастернака

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ОСАДКИ ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТА ПО МЕТОДУ ПОСЛОЙНОГО СУММИРОВАНИЯ

Фундамент с размерами $b \times l = 19,08 \times 40,2$ м и глубиной заложения $d = 3,9$ м передает на основание вертикальную нагрузку $N = 16\,100,465$, $T = 157,89$ МН. Значение модулей деформации грунтов составляет: $E_{02} = 30$ МПа, $E_{03} = 43$ МПа, $E_{04} = 26$ МПа.

Характеристики грунтов и мощности слоев представлены в табл. 2.

Таблица 2

Список грунтов

Наименование	Удельный вес, T/m^3	Модуль деформации, T/m^2	Модуль упругости, T/m^2	Коэффициент Пуассона	Коэффициент переплотнения	Давление переплотнения, T/m^2	Мощность слоя h , м
Техногенный грунт	1,8	1 019,368	8 494,733	0,3	1	0	1,4
Техногенный грунт (взвешенный)	0,48	1 019,368	8 494,733	0,3	1	0	1
Суглинок полутвердый	2,21	3 058,104	25 484,2	0,35	1	5	8,3
Суглинок твердый	2,27	4 383,282	36 527,353	0,35	1	5	6,2
Глина твердая	2,09	2 650,357	22 086,307	0,2	1	5	5,1

Осадка методом послойного суммирования вычисляется по формуле

$$s = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{zy,i}) \cdot h_i}{E_i} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zy,i} \cdot h_i}{E_{e,i}},$$

где β – безразмерный коэффициент, принимаемый равным 0,8; n – число слоев грунта в пределах сжимаемой толщи; h_i – толщина i -го слоя; $h_i < 0,4b$; $\sigma_{zp,i}$ – среднее значение вертикального напряжения от внешней нагрузки в i -м слое грунта; $\sigma_{zy,i}$ – среднее значение вертикального напряжения в i -м слое от собственного веса грунта, выбранного при отрывке котлована; E_i – модуль деформации грунта i -го слоя; $E_{e,i} = 5E_i$.

Давление подошвы фундамента на основание

$$p = \frac{N}{l \cdot b} = \frac{157\,890}{40,2 \times 19,08} = 205,85 \text{ кПа},$$

$$s = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{zy,i}) \cdot h_i}{E_i} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zy,i} \cdot h_i}{E_{e,i}}.$$

Для расчета осадки определяем вертикальные напряжения от собственного веса грунта, от внешней нагрузки и от собственного веса грунта, выбранного при отрывке котлована грунта по оси фундамента по формулам:

$$\sigma_{zg} = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i;$$

$$\sigma_{zp} = \alpha \cdot p;$$

$$\sigma_{zy} = \alpha_k \cdot \sigma_{zg,0}.$$

В точке 2 выполняется условие

$$\sigma_{zp} = 138,74 \text{ кПа} \leq 0,5\sigma_{zg} = 182,085 \text{ кПа}.$$

Осадка по методу послойного суммирования

$$s = 0,8 \left(\frac{(194,94 - 69,86) \cdot 6,8}{30\,000} + \frac{(161,385 - 59,365) \cdot 6,2}{43\,000} \right) = 0,0344 \text{ м} = 3,4 \text{ см}.$$

Строятся эпюры вертикальных напряжений от собственного веса грунта σ_{zg} , внешней нагрузки σ_{zp} , собственного веса грунта σ_{zy} , выбранного при отрывке котлована, и $m \cdot \sigma_{zg}$.

Находят точку пересечения графиков $0,5\sigma_{zg}$ и σ_{zp} . Спроецировав данную точку на ось глубины, получим глубину сжимаемой толщи $H_c = 11,14$ м. Эта величина показывает, что при увеличении глубины напряжение от внешней нагрузки становится меньше напряжения от собственного веса грунта. Следовательно, напряжения, которые находятся ниже отметки

$$s = 0,8 \left(\frac{(194,94 - 69,86) \cdot 6,8}{30\,000} + \frac{(172,5 - 61,53) \cdot 4,34}{43\,000} \right) = 0,0316 \text{ м} = 3,16 \text{ см},$$

не учитываются при расчете осадки.

Сравнение результатов расчета осадки здания по трем моделям сведено в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета осадки

Характеристика	Программа КРОСС	Программа Пастернак	СП.22.13330.2016
Максимальная осадка здания, см	2,548	3,366	3,16

Таким образом, программа для расчета коэффициентов постели по модели основания Винклера моделирует грунт как набор независимых пружин. Модель не учитывает непрерывность грунтового массива и распространение напряжений в стороны. Она дала заниженную осадку, так как не был учтен распор грунта.

Программа для расчета коэффициентов C_1 и C_2 – двухпараметрическая модель, которая учитывает сдвиговые взаимодействия между пружинками. Она ближе к реальному поведению грунтового массива, так как позволяет работать грунту как цельному массиву, поэтому осадка максимальная.

Метод послойного суммирования, реализованный в СП 22.13330.2016, рассматривает грунт как линейно-деформируемое полупространство, учитывает распространение напряжений в глубину и в стороны.

Основной расчетной моделью для определения усилий в плите и подборе армирования в ПВК следует считать модель Пастернака. Ее результаты подтверждаются расчетом осадки методом послойного суммирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модели грунтов, реализованные в программных комплексах SCAD Office и Plaxis 3D / Е.С. Егорова [и др.] // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2016. № 3 (42). С. 31–60.
2. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD: учебное пособие / В.С. Карпиловский [и др.]. М.: СКАД СОФТ, 2009. 648 с.

3. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. URL: <https://agentstvotek.ru/upload/files/СП%2022.13330.2016.pdf> (дата обращения: 09.02.2025).
4. КРОСС. Определение коэффициентов постели по результатам геологических изысканий. Руководство пользователя. Киев: SCAD Group, 2001. 41 с.
5. Алехин А.Н. Краткая характеристика моделей грунта // *Академический вестник УралНИИПроект РААСН*. 2011. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kratkaya-harakteristika-modeley-grunta> (дата обращения: 09.02.2025).
6. A Review on Soil-Foundation-Interaction Models / G. Pandey [et al.] // *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*. 2023. Т. 11. № 3. С. 158–179.
7. Горб А.М. Выбор расчетной модели основания при проектировании плит промышленных полов // *Склад и техника*. 2009. № 1-2. С. 1–2.
8. Основы и фундаменты: учебное пособие / И.Н. Кокунько [и др.]. URL: https://rgups.ru/site/assets/files/127130/osnovaniia_i_fundamenty.pdf (дата обращения: 09.02.2025).
9. Шеин А.И. Динамика и устойчивость сооружений: обеспечение сейсмостойкости зданий и сооружений: учебное пособие. Пенза: ПГУАС, 2015. 108 с.
10. Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Вержиковский В.В., Заритовский Д.С. Исследование напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты выставочного павильона Технопарка РГСУ с учетом различных моделей основания // *Инженерный вестник Дона*. 2015. № 4-1. С. 30–38.
11. Лукьянов А.И., Тюфанов В.А. Выбор модели грунтового основания, реализованных в ПК SCAD office // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2021. № 1. С. 29–37.
12. Субботин С.Л., Крылов А.Д. Выбор модели грунтового основания для расчета фундаментной плиты в современном ПВК SCAD Office++ // *Теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов*. 2025. № 1.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СУББОТИН Сергей Львович – доктор технических наук, профессор кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sbtn@yandex.ru
КРЫЛОВ Алексей Дмитриевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: krylovalesha791@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Субботин С.Л., Крылов А.Д. Расчет и сравнение осадок фундаментной плиты по разным моделям грунтового основания в современном программно-вычислительном комплексе // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2026. № 1 (29). С. 26–35.

**CALCULATION AND COMPARISON OF FOUNDATION SLAB SEDIMENTS
ACCORDING TO DIFFERENT MODELS OF THE SOIL BASE IN MODERN
SOFTWARE AND COMPUTING COMPLEX**

S.L. Subbotin, A.D. Krylov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article considers the calculation and results of comparing the sediments of the foundation slab of a 12-storey monolithic residential building with public premises according to different models of the soil foundation.

Keywords: ground base, sediment, Winkler model, Pasternak model, layer-by-layer summation method.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SUBBOTIN Sergey Lvovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sbtn@yandex.ru

KRYLOV Alexey Dmitrievich – Master's Degree Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: krylovalesha791@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Subbotin S.L., Krylov A.D. Calculation and comparison of foundation slab sediments according to different models of the soil base in modern PVC // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2026. No. 1 (29), pp. 26–35.

УДК 69.07

**ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА И СРОКА СЛУЖБЫ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ ПОКРЫТИЯ ЗДАНИЯ КОТЕЛЬНОЙ
В УСЛОВИЯХ АГРЕССИВНОЙ СРЕДЫ**

А.А. Черняев, К.В. Марфин
Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева (г. Орел)

© Черняев А.А., Марфин К.В., 2026

Аннотация. В статье выполнены теоретические расчеты и произведен анализ изменения остаточного ресурса и срока службы железобетонной балки покрытия на примере обследуемого здания котельной, расположенной в 909-м жилом квартале г. Орла. Рассмотрена предварительно напряженная балка пролетом 12 м, предназначенная для покрытий зданий с плоской и скатной кровлей, выполненная по серии 1.462.1-1/88.

Приведены результаты расчета балки после технологического воздействия с образованием коррозии предварительно напряженной рабочей арматуры в нижней грани. Построен теоретический график изменения со временем запаса по армированию рабочей преднапряженной арматуры. Определен теоретический срок службы балки в рассматриваемых условиях эксплуатации.

Ключевые слова: железобетонная балка покрытия, коррозия стальной арматуры, остаточный ресурс, срок службы.

DOI: 10.46573/2658-7459-2026-1-35-43

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации в средах разной степени агрессивности строительные конструкции претерпевают ухудшение свойств материалов и, как следствие, потерю несущей способности [1], в том числе по причине коррозионного износа [2, 3]. Поэтому при эксплуатации зданий важно своевременно выполнять их обследование [4], а также производить теоретическую оценку остаточного ресурса и срока службы [5], что особенно актуально для объектов тепловой энергетики (котельных) [6, 7] жилых кварталов и районов, которые играют важную роль в жилищном хозяйстве города.

Анализ указанных и других публикаций показал, что вопросы, рассматриваемые в настоящем исследовании, по-прежнему актуальны. Отличие и новизна состоят в различных подходах к общей оценке работоспособности, определению фактического состояния, моделированию и учету потерь несущей способности от коррозии стальной арматуры.

Цель исследования заключается в анализе и теоретической оценке остаточного ресурса и срока службы железобетонной балки покрытия здания котельной в существующем на момент обследования техническом состоянии и условиях эксплуатации с учетом коррозии арматуры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Описание объекта исследования

Здание квартальной котельной, расположенной по адресу: г. Орел, ул. Кромская, д. 7а, размерами в осях в плане 30 х 12 м. Высота на отметке +7,870. Конструктивная система каркасная с железобетонными несущими колоннами и балками покрытия по серии 1.462.1-1/88. Шаг рам 6 м. В здании котельной находятся 3 котла на отметках пола +0,150. От котлов через технологические дренажные сборники происходит воздействие пара на балки покрытия (рис. 1).

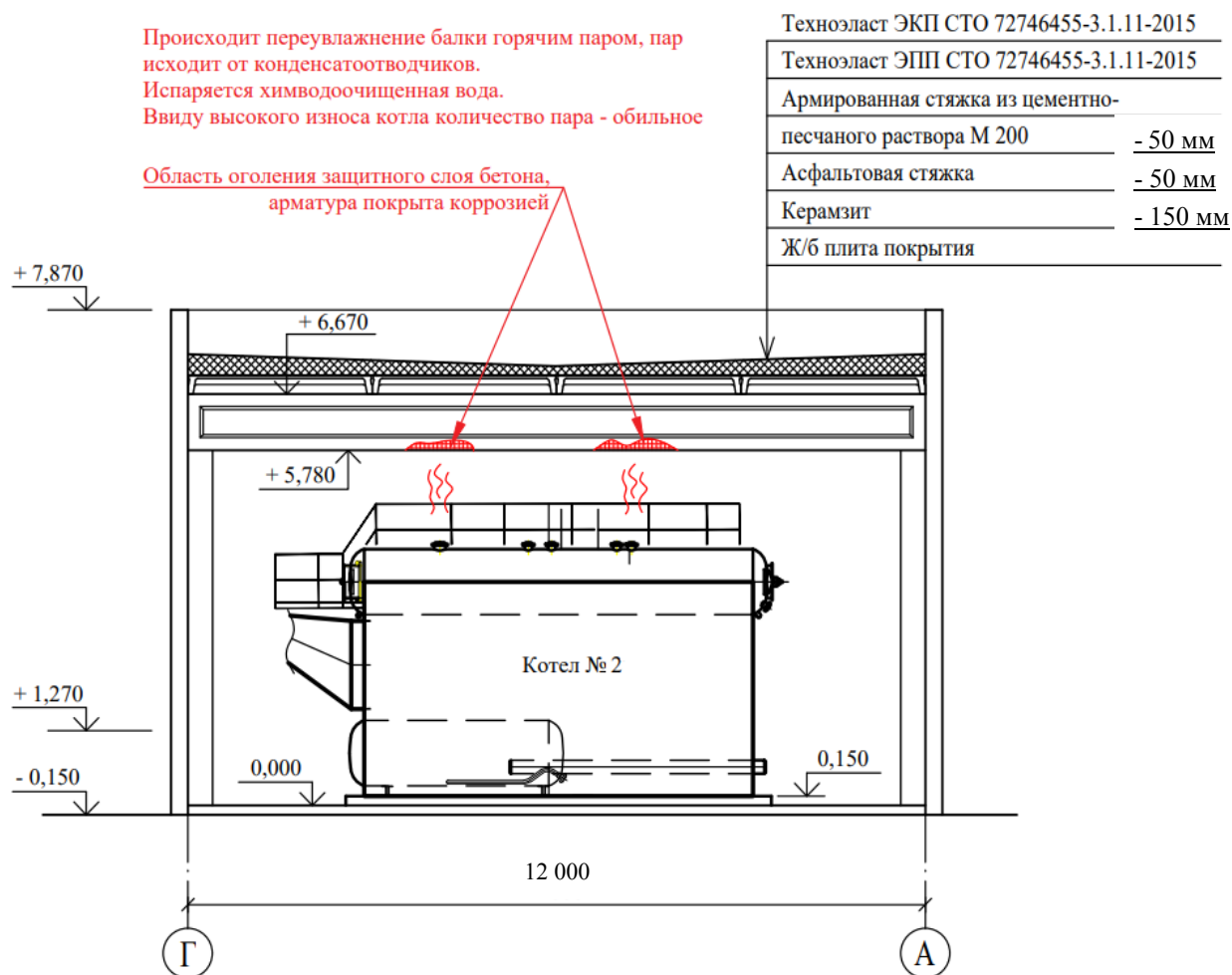
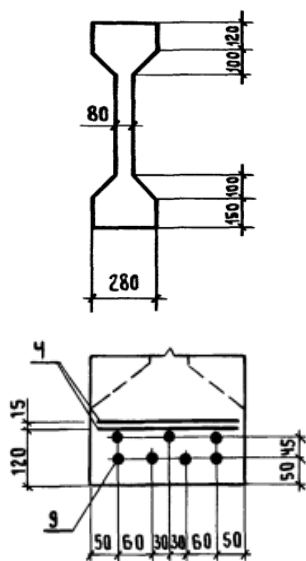


Рис. 1. Железобетонная балка покрытия здания котельной на поперечном разрезе с указанием мест коррозии стальной арматуры в нижней грани (рисунок авторов)

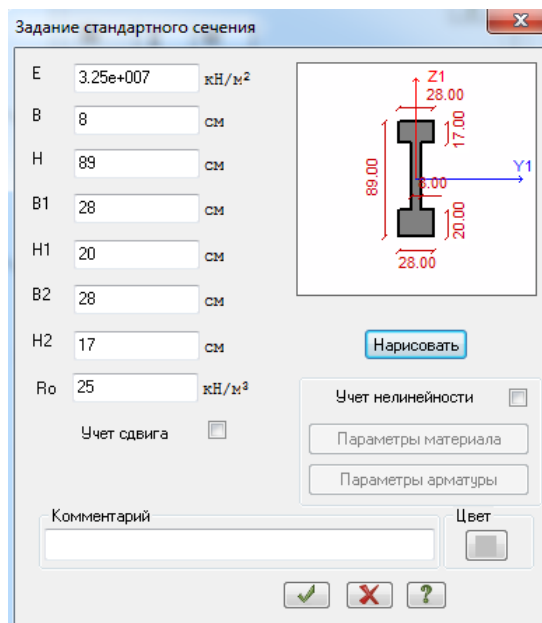
Марка балки 1 БСП 12-4 АтVСК-Н; армирование балки по серии 1.462.1-1/88: напрягаемая арматура в нижней полке 7 Ø18 А800 (рис. 2) (установлено по результатам обследования).

Бетон балки класса по прочности на сжатие В30 (приведено от марки к классу по табл. 6.1 [8]); фактическая прочность бетона определялась неразрушающим методом при использовании электронного склерометра ОНИКС-2.5.

Результаты химического анализа воды в котельной (табл. 1) и данные по коррозии арматуры (табл. 2) предоставлены организацией-заказчиком для выполнения расчетов.



а



б

Рис. 2. Сечение балки 1 БСП 12-4 АтVCK-H:

а – армирование сечения балки по серии 1.462.1-1/88;

б – эквивалентное сечение балки для расчета (Print Sclin в программе ЛИРА-САПР)

Таблица 1

Химический анализ исходной воды в котельной по адресу:
г. Орел, ул. Кромская, д. 7а, кв. 909

№	Определяемый показатель	Единица измерения	Результат исследования
1	Цветность	градус цв.	3,1
2	Мутность	мг/кг	0,22
3	pH	ед. pH	7,8
4	Жесткость общ.	мг-экв/кг	7,5
5	Щелочность общ.	мг-экв/кг	6,3
6	Солесодержание	мг/кг	487
Катионы			
7	Кальций (Ca^{2+})	мг/кг	105,0
8	Магний (Mg^{2+})	мг/кг	27,2
9	Железо (Fe^{2+})	мг/кг	0,14
10	Натрий + калий ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)	мг/кг	12,8
Анионы			
11	Бикарбонаты (HCO_3^-)	мг/кг	384,4
12	Сульфаты (SO_4^{2-})	мг/кг	49,0
13	Хлориды (Cl^-)	мг/кг	31,0

Таблица 2

Коррозия арматуры

Параметр	Исходное значение	Через 10 лет	Через 20 лет
Диаметр стержня (Ø18 мм), мм	18,00	16,74	14,44
Площадь сечения стержня, мм ²	254,5	219,8	163,8
Суммарная площадь сечений стержней (7 шт.), мм ²	1 781,5	1 538,6	1 146,6
Потеря суммарной площади сечения, %	–	13,6	35,6

Ключевыми факторами деградации арматуры явились:

высокая температура (увеличивающая скорость коррозии);

наличие хлоридов (31,0 мг/кг), выступающих основным агрессивным агентом;

отсутствие гидроизоляции.

Расчет предварительно напряженной железобетонной рассматриваемой балки по предельным состояниям первой группы выполнялся по п. 9.2 [8]. В расчетах было принято:

влажность воздуха окружающей среды более 75 %;

коэффициент ползучести бетона $\varphi_{b,cr} = 1,6$ по п. 6.1.16 [8].

При расчете железобетонной балки использовался общий алгоритм произведения вычислений в [9] с учетом действующих положений норм [8].

Сбор нагрузок на балку выполнялся в соответствии с [10, 11], коэффициент надежности по ответственности $\gamma_n = 1$.

Нагрузки, учтенные в расчете

Постоянные нагрузки P_d на покрытие (по результатам сбора нагрузок от слоев, см. рис. 1):

нормативная – 4,91 кН/м²;

расчетная – 6,07 кН/м².

Собственный вес балки принят по серии 1.462.1-1/88; коэффициент надежности $\gamma_f = 1,1$ по [10].

Временная нагрузка – снеговая S : нормативное значение веса снегового покрова 1,40 кН/м² [10, прил. К] для г. Орла; полное расчетное значение снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия 1,21 кН/м².

Тип местности В; $c_e = 0,748$ (коэффициент, учитывающий снос снега с покрытия здания под действием ветра и иных факторов, принимаемый в соответствии с п. 10.7 [10]); коэффициент длительной части снеговой нагрузки 0,5 по табл. Д.1 прил. Д [10].

Сочетание нагрузок: основное по п. 6.2 [10].

Эпюры внутренних усилий определялись методами строительной механики, характерные ординаты моментов M , поперечных сил Q в местах коррозии и середине пролета. Расчетный пролет балки $L = 11,6$ м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предварительно выполненный поверочный расчет железобетонной балки покрытия при нормальной среде ($\varphi_{b,cr} = 2,3$ по п. 6.1.16 [8]) позволил подтвердить установленную при обследовании марку 1 БСП 12-4 АтVСК-Н по серии 1.462.1-1/88.

Были произведены расчеты балки по предельным состояниям первой и второй группы [11]. В табл. 3. приведено сопоставление числовых значений ряда характерных величин результатов расчетов при нормальной и при агрессивной среде. Расчетное сечение для сопоставления преднапряженной арматуры в нижней грани A_{sp} : на расстоянии 4,7 м справа (в месте наибольшей коррозии, см. рис. 1).

Таблица 3

Результаты расчетов железобетонной балки покрытия

Показатель	Значение		
	при нормальной среде	при агрессивной среде (через 10 лет)	при агрессивной среде (через 20 лет)
Расчет по предельным состояниям первой группы – расчет по прочности по нормальному сечению по п. 9.2 [8]			
Запас по армированию рабочей преднапряженной арматуры A_{sp} (сечение в месте коррозии)	382 мм ² (21,4 %)	139 мм ² (9,9 %)	–253 мм ² (–18,0 %)
Расчет по предельным состояниям второй группы [8, 10]			
Полные суммарные потери предварительного напряжения $\Delta\sigma_{sp(2)}$	68,7 МПа (принято 100 МПа)	66,9 МПа (принято 100 МПа)	–
Момент трещинообразования M_{crc} (запас в процентах по моменту)	753,272 кНм (14,4 %)	638,875 кНм (2,1 %)	–
Прогиб балки f	–0,006 м	–0,001 5 м	–

Примечание. Прочерк означает расчетный выгиб балки вверх в середине пролета (условие табл. Д.1 прил. Д [10] выполняется).

На рис. 3 показан график запаса по армированию рабочей преднапряженной арматуры A_{sp} .

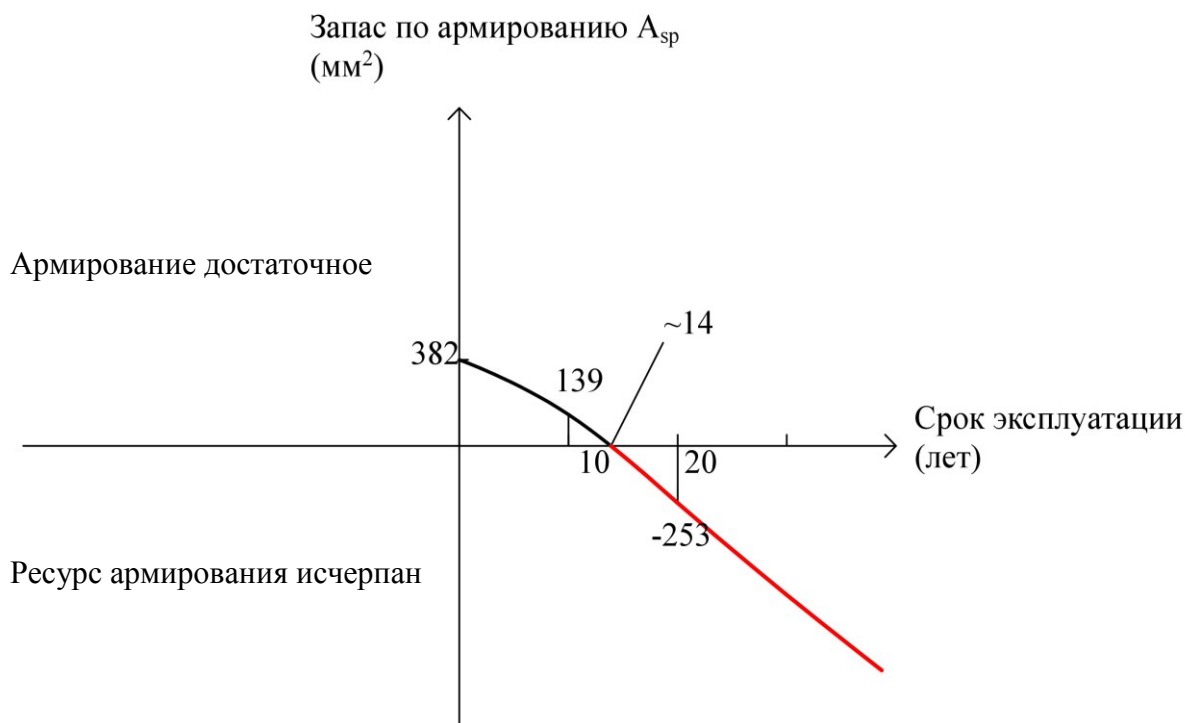


Рис. 3. График запаса по армированию рабочей преднапряженной арматуры A_{sp} (рисунок авторов)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный расчет железобетонной балки покрытия в существующем на момент обследования техническом состоянии и рассмотренных условиях эксплуатации позволил установить ее теоретический остаточный ресурс по армированию (запас по рабочей преднапряженной арматуре A_{sp}).

Произведенный анализ результатов позволил спрогнозировать срок службы балки в условиях среды разной степени агрессивности при предоставленных исходных данных по коррозии арматуры для выполнения расчетов, составивший порядка ~14 лет при условии непрерывного воздействия нагрузок и работе котлов.

Чтобы правильно оценить полученный результат, следует отметить, что в реальных условиях эксплуатации котельных, как правило, не происходит непрерывного длительного и высокотемпературного воздействия на конструкции покрытия, поэтому полученный результат следует разложить на реальное время работы с учетом перерывов. Представляется, что данные для учета коррозии арматуры в расчетах были предоставлены с запасом в худшую сторону.

В случае отличных от рассмотренных случаев повреждений, коррозии в других местах (коррозия поперечной арматуры ближе к опорам или существенные сколы бетона в сжатой зоне, деградация бетона и пр.) следует рассмотреть возможные другие характерные показатели и подходы в расчетах [12], что открывает перспективу для дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черняев А.А., Савин С.Ю., Коробко В.И. Введение в специальность «Строительство»: учебник для высших учебных заведений. Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 208 с.
2. Ягупов Б.А., Мигаль Р.Е. К вопросу оценки несущей способности эксплуатируемых железобетонных конструкций, поврежденных коррозией // *Бетон и железобетон*. 2007. № 3. С. 28–30.
3. Моралес Х.Г., Фрага Э.С. Коррозия арматуры в бетоне. Механизмы, мониторинг и методы контроля: пер. с англ. М.: Техносфера, 2016. 328 с.
4. Малахов А.В., Косинов В.В., Марфин К.В. Обследование эксплуатируемых, переоборудованных и неэксплуатируемых промышленных зданий. *Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: Материалы IX научно-практической конференции*. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018. С. 140–147.
5. Ахвердов И.Э., Соколов Б.С. Прогнозирование остаточного ресурса строительных конструкций с учетом коррозионного износа. Ростов н/Д.: Феникс, 2011. 224 с.
6. Крылов Б.А., Гусев Б.В. Тепловлажностный режим зданий котельных и его влияние на коррозию конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 8. С. 58–62.
7. Трофимов Б.Я., Королев Е.В. Влияние термовлажностных воздействий на долговечность бетонных и железобетонных конструкций энергетических объектов // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 11. С. 1423–1435.
8. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции (с изм. № 1, 2). М.: Минстрой России, 2021. 160 с.
9. Михалевич Н.В., Шахова Е.Н. Железобетонные конструкции. Расчет двускатной предварительно напряженной железобетонной балки покрытия. Вологда: ВоГТУ, 2008. 36 с.
10. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия (с изм. № 1, 2, 3, 4): М.: Минстрой России, 2022. 102 с.
11. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2014. 23 с.
12. Методическое пособие по назначению срока службы бетонных и железобетонных конструкций с учетом воздействия среды эксплуатации на их жизненный цикл. М.: НИИЖБ, 2019. 127 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЧЕРНЯЕВ Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», 302026, Россия, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95. E-mail: Chernyev87@yandex.ru

МАРФИН Кирилл Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций и материалов, ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», 302026, Россия, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95. E-mail: marfinkirill@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Черняев А.А., Марфин К.В. Оценка остаточного ресурса и срока службы железобетонной балки покрытия здания котельной в условиях агрессивной среды // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 4 (28). С. 35–43.

**ASSESSMENT OF THE RESIDUAL LIFE AND SERVICE LIFE
OF A REINFORCED CONCRETE ROOF BEAM OF A BOILER HOUSE
IN AN AGGRESSIVE ENVIRONMENT**

A.A. Chernyaev, K.V. Marfin

Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel)

Abstract. Theoretical calculations and an analysis of the residual life and service life of a reinforced concrete roof beam are performed using the example of the surveyed boiler house building located in residential block 909 in Oryol. The beam is a prestressed reinforced concrete beam with a span of 12 m for roofs of buildings with flat and pitched roofs, manufactured according to series 1.462.1-1/88. The results of calculations for the reinforced concrete beam after technological impact with the formation of corrosion of the working prestressed reinforcement at the bottom face are presented. A theoretical graph of the change in the reinforcement reserve of the working prestressed reinforcement over time is constructed. The theoretical service life of the beam under the considered operating conditions is determined.

Keywords: reinforced concrete roof beam; corrosion of steel reinforcement; residual life; service life.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

CHERNYAEV Andrey Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Orel State University named after I.S. Turgenev, 95, Komsomolskaya st., Orel, 302026, Russia. E-mail: Chernyev87@yandex.ru

MARFIN Kirill Vasilyevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures and Materials, Orel State University named after I.S. Turgenev, 95, Komsomolskaya st., Orel, 302026, Russia. E-mail: marfinkirill@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Chernyaev A.A., Marfin K.V. Of a reinforced concrete roof beam of a boiler house in an aggressive environment // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2026. No. 1 (29), pp. 35–43.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.314.21.042.52

**ОБОСНОВАНИЕ ПРИБЛИЖЕННОГО МЕТОДА ХОЛОСТОГО ХОДА
ДЛЯ РАЗДЕЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССЕЯНИЯ
ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ*****В.И. Безденежных****Курганский государственный университет (г. Курган)*

© Безденежных В.И., 2026

Аннотация. Исследование имеет своей целью обоснование экспериментального метода определения реактивных сопротивлений рассеяния для каждой обмотки в отдельности. Актуальность работы обусловлена повсеместным распространением трансформаторов. Раскрыта сущность разработанного метода, указаны его преимущества и недостатки практического использования. Установлена возможность измерения сопротивлений рассеяния обмоток трансформатора по отдельности несколькими способами. Предложенный способ характеризуется простотой и удовлетворительной точностью результатов.

Ключевые слова: реактивное сопротивление, измерение, напряжение, ток.

DOI: 10.46573/2658-7459-2026-1-44-49**ВВЕДЕНИЕ**

В работе [1] представлены три способа экспериментального определения реактивных сопротивлений рассеяния трансформатора для каждой обмотки по отдельности.

Ранее такая операция считалась невозможной, поэтому измерялось суммарное сопротивление обеих обмоток, а результат делился пополам и приписывался каждой обмотке, что приводило к существенным ошибкам, поскольку почти в каждом случае указанные сопротивления различаются. При этом цилиндрические концентрические обмотки даже имеют противоположный характер реактивности. На рис. 1 представлено распределение поля рассеяния в радиальном направлении (магнитной индукции B (B^2) [2–5]) для данного случая.

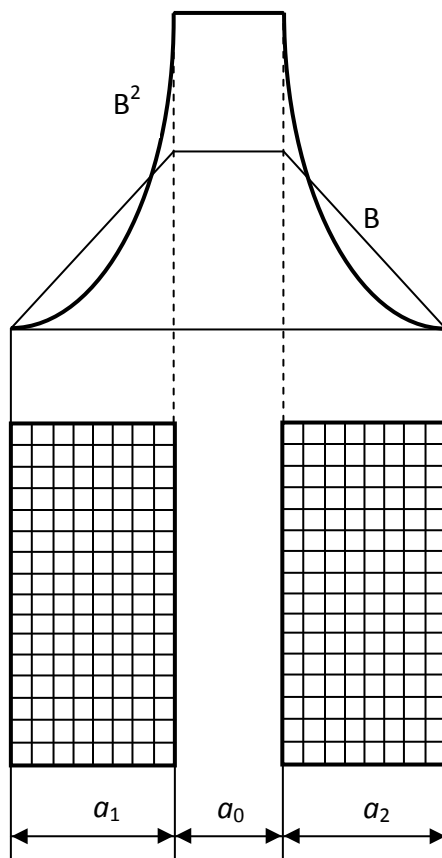


Рис. 1. Распределение поля рассеяния
в радиальном направлении

Отрицательное (емкостное) сопротивление рассеяния характерно для внутренней цилиндрической обмотки и обусловлено тем, что для нее собственный поток рассеяния меньше потока поглощения от внешней обмотки (разница отрицательная). Отрицательным (емкостным) сопротивлением могут обладать не только конденсаторы [6–9].

Для других видов обмоток, например раздельных (т.е. расположенных на разных стержнях), сопротивление рассеяния носит индуктивный характер для обеих обмоток.

Исследование имеет своей *целью* обоснование четвертого экспериментального метода определения реактивных сопротивлений рассеяния для каждой обмотки в отдельности.

Актуальность работы обусловлена повсеместным распространением трансформаторов [10].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

У двух идентичных трансформаторов последовательно соединяются первичные обмотки, в результате чего схема принимает вид, представленный на рис. 2.

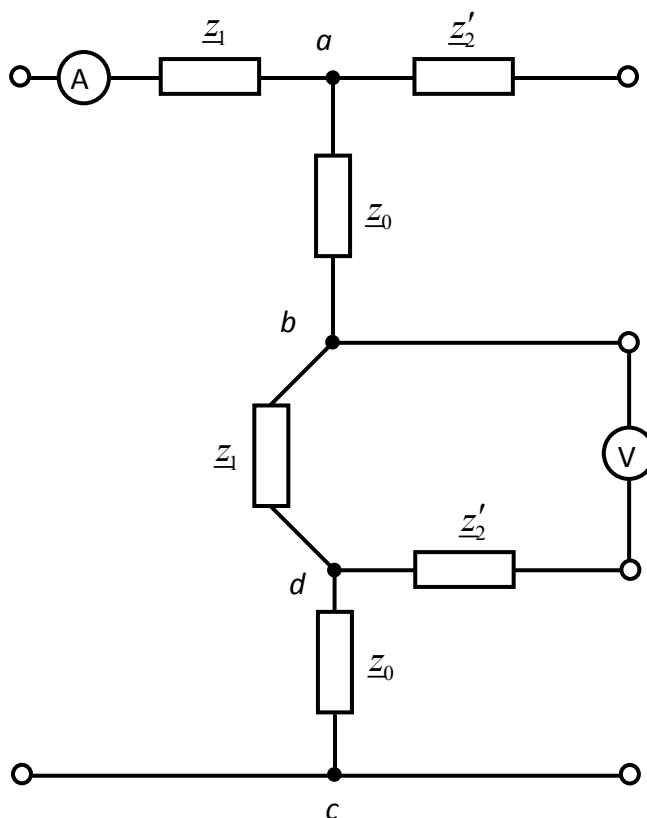


Рис. 2. Схема замещения
для последовательного соединения (XX)

Из схемы замещения непосредственно следует, что

$$z_1 = \frac{U'_{bd}}{I_{01}}. \quad (1)$$

Величины r_1 , r_2' , $x_k = x_1 + x_2'$ определяются известными экспериментальными методами:

$$\begin{aligned} x_1 &= \sqrt{z_1^2 - r_1^2}, \\ x_2' &= x_k - x_1. \end{aligned} \quad (2)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Два идентичных трансформатора соединяют по схеме в соответствии с рис. 2.
2. Измеряют и «приводят» величины: I_{01} , U'_{bd} , r_1 , r_2' , x_k .
3. В соответствии с уравнением (1) определяют z_1 .

4. Определяют x_1 .

5. В соответствии с (2) определяют x'_2 .

Пример. Два идентичных трансформатора ОСМ-1,00 соединены по схеме, показанной на рис. 2. Измеренные величины: $I_{01} = 0,4$ А; $U'_{bd} = 0,441$ В; $r_1 = 1,1$ Ом; $r'_2 = 0,2$ Ом; $x_k = 0,52$ Ом.

$$z_1 = \frac{U'_{bd}}{I_{01}} = \frac{0,441}{0,4} = 1,103 \text{ Ом},$$

$$x_1 = \sqrt{z_1^2 - r_1^2} = \sqrt{1,103^2 - 1,1^2} = 1,103 \text{ Ом},$$

$$x'_2 = x_k - x_1 = 0,52 - (-0,08) = 0,6 \text{ Ом}.$$

Полученные значения хорошо соответствуют результатам других экспериментальных методов [1]:

$$x_1 = -0,081; -0,080; -0,07 \text{ Ом},$$

$$x'_2 = 0,562; 0,559; 0,59 \text{ Ом}.$$

Недостатком приближенного метода холостого хода при последовательном соединении по сравнению с высокоточными методами является необходимость наличия двух идентичных трансформаторов, а его сравнительным достоинством – простота проведения экспериментов.

Оценка достоверности значений сопротивлений рассеяния

В соответствии с [1]

$$\frac{x'_2}{x_1} = -\frac{a_1/2 + a_0 + a_2/3}{a_1/6},$$

где a_1, a_0, a_2 – величины, указанные на рис. 1. Пусть, например, $a_1 = 3a_0 = a_2 = a$. При этом

$$\frac{x'_2}{x_1} = -\frac{a/2 + a/3 + a/3}{a/6} = -7.$$

Для величин из приведенного примера

$$\frac{x'_2}{x_1} = -\frac{0,6 \text{ Ом}}{0,08 \text{ Ом}} = -7,5.$$

Таким образом, полученные значения сопротивлений рассеяния представляются достоверными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопротивления рассеяния обмоток трансформатора могут быть измерены по отдельности, причем несколькими способами.

Предложенный в данной статье четвертый способ характеризуется простотой и удовлетворительной точностью результатов.

Полученные результаты рекомендуется использовать при исследованиях трансформаторов и в учебном процессе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.П. Рассеяние магнитного потока в трансформаторах // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 4 (8). С. 81–88. DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-81-88
2. Попов И.П. Трииндуктивный осциллятор // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 1 (13). С. 50–55. DOI: 10.46573/2658-7459-2022-50-55
3. Попов И.П. Магнитный заряд. Осевое взаимодействие проводников с токами // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 1 (25). С. 67–73. DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-67-73
4. Павлов В.Д. Интерпретация результатов измерения кванта магнитного потока // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 1 (25). С. 61–67. DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-61-67
5. Попов И.П. Приоритет электродинамики над механикой на примере второго закона Ньютона // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 3 (23). С. 62–69. DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-62-69
6. Безденежных В.И. Мгновенное значение момента, развиваемого синхронным генератором при индуктивной и емкостной нагрузке // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 2 (26). С. 36–39. DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-36-39
7. Попов И.П. Амплитудно-частотные особенности режимов нагрузки синхронной электрической машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 49–56.
8. Попов И.П. Электромеханический маховик с искусственным (емкостным) моментом инерции // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 58–63. DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-58-63
9. Попов И.П. Влияние сети на реактивную мощность // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 1 (17). С. 55–60. DOI: 10.46573/2658-7459-2023-1-55-60

10. Араратьян Л.С., Крупнов А.В., Кожекин А.Н. Энергоэффективные силовые трансформаторы с сердечником из аморфной стали // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2019. № 3 (3). С. 51–57.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЗДЕНЕЖНЫХ Валентина Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», 640020, Россия, г. Курган, ул. Советская, д. 63/4. E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Безденежных В.И. Обоснование приближенного метода холостого хода для отдельного определения рассеяния обмоток трансформаторов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2026. № 1 (29). С. 44–49.

RATIONALE FOR AN APPROXIMATE NO-LOAD METHOD FOR SEPARATE DETERMINATION OF TRANSFORMER WINDING DISPERSION

V.I. Bezdeneshnykh

Kurgan State University (Kurgan)

Abstract. The study aims to substantiate an experimental method for determining the reactive scattering resistances for each winding individually. The relevance of this work is due to the widespread use of transformers. The essence of the developed method is revealed, and its advantages and disadvantages for practical use are indicated. The possibility of measuring the scattering resistances of transformer windings individually using several methods is established. The proposed method is characterized by simplicity and satisfactory accuracy of the results.

Keywords: reactive resistance, measurement, voltage, current.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

BEZDENESHNYKH Valentina Ivanovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Kurgan State University, 63/4, Sovetskaja street, Kurgan, 640020, Russia. E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Bezdeneshnykh V.I. Rationale for an approximate no-load method for separate determination of transformer winding dispersion // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2026. No. 1 (29), pp. 44–49.

УДК 621.311: 004.056

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ****К.Б. Корнеев¹, В.К. Корнеев²**¹*Тверской государственный технический университет (г. Тверь),*²*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (г. Москва)*

© Корнеев К.Б., Корнеев В.К., 2026

Аннотация. Увеличение использования информационных технологий в промышленном секторе и, что наиболее важно, в таком критически важном направлении, как энергетика, приводит к необходимости построения систем контроля потоков информации, собираемой, передаваемой и обрабатываемой на предприятиях отрасли. При этом перенос хранения и обработки информации в «облако», с одной стороны, повышает надежность и скорость обработки информации, а с другой – делает систему более уязвимой для внешнего нелегитимного воздействия. Интеграция высокосвязанных элементов сети «интернета вещей» (IoT) также может негативно повлиять на защищенность информации.

Ключевые слова: электроэнергетика, информационная безопасность, кибератака, киберпреступления, надежность.

DOI: 10.46573/2658-7459-2026-1-50-58

Спрос на более активное управление энергией и более доступное энергоснабжение способствовал быстрому росту распределенной генерации у потребителей. Тем самым клиенты получили доступ к более сложным энергетическим продуктам, наделенным интеллектуальными технологиями и алгоритмами для удаленного и автономного управления спросом на энергию. Генерирующим активам необходимо максимально использовать присущую им гибкость в изменении мощности, которая потенциально приносит пользу всей системе, сохраняя при этом стабильность на всех ее уровнях. В последнее время все больше внимания уделяется цифровым функциям управления, таким как искусственный интеллект (ИИ) и аналитика. Эти интеллектуальные элементы способствуют обеспечению баланса мощности в режиме реального времени, проводя мониторинг и контроль с высокой степенью детализации и точности. Заинтересованные стороны в локальных системах Smart-Grid («умной сети») могут получить выгоду от возможности локального управления по той причине, что может быть достигнута автономная и локально самодостаточная энергетическая система.

Однако интенсивный обмен информацией между интеллектуальными элементами может привести к серьезной проблеме безопасности из-за конкурирующих интересов различных пользователей или заинтересованных сторон, высокого уровня взаимозависимости, а также в силу своей социальной и технической сложности. В таком взаимодействии сталкиваются интересы двух сторон, где генерирующая компания стремится к максимально точному учету отпущенной энергии, а потребитель старается заплатить минимальную цену за потребленную энергию, что порой ведет к применению противозаконных методов воздействия на системы учета и управления [1]. Во

взаимодействии могут также участвовать сторонние силы, которые имеют деструктивные намерения, направленные на снижение надежности функционирования энергосистемы [2].

В целом существует две категории угроз, связанных с обработкой информации в энергосетях: эксплуатационные угрозы и информационные угрозы. Выделяют три типа эксплуатационных угроз – манипулирование данными, выдачу себя за другое лицо и отказ в обслуживании (DoS). Вторая категория угроз – это угроза раскрытия конфиденциальной информации. Интеллектуальные элементы неизбежно увеличат и без того значительный обмен данными, поднимая требования к конфиденциальности и неразглашению информации на чрезвычайно высокий уровень [4–6]. Хотя больше внимания уделяется именно этой области, все еще отсутствует понимание цифрового перехода энергетической системы и методики работы с большими данными. Современная диспетчеризация очень сильно зависит от точных измерений, а также интерактивного управления через интеллектуальные элементы. Анализ на основе больших данных помогает в поддержке принятия решений, а также автоматизирует процесс управления оперативными переключениями; кроме того, на основе этого анализа может осуществляться стратегическое планирование во многих службах энергопредприятий. Таким образом, целостность данных имеет первостепенное значение для адекватности управления энергосистемой [7].

Как правило, основная часть атак на объекты энергосистемы и жилищно-коммунального хозяйства направлена на ограничение функциональности по причине значительно большего экономического эффекта, производимого неработоспособностью систем, по сравнению с косвенными репутационными потерями. Тем не менее в последние годы с увеличением экономического влияния биржевых показателей на инвестиционные и эксплуатационные показатели работы энергокомпаний негативная информация о доступе к данным может значительно сказаться на финансовых показателях и показателях реализации проектов. По этой причине защита данных от кибератак становится одним из приоритетных направлений работы отделов информатизации и безопасности предприятий.

Согласно современному подходу [8], кибератакам подвергается целостность общей информации, конфиденциальность данных и доступность обслуживания. Эти три типа кибератак частично пересекаются, а частично входят в ранее обозначенные типы эксплуатационных и информационных угроз. В зависимости от цели выделяют четыре основные категории кибератак: на доступность сети, на конфиденциальность, на устройство и на данные. Для проникновения и захвата контроля над информационными системами и системами управления злонамеренное вмешательство обычно использует четыре метода – сканирование, эксплуатацию, разведку и поддержание доступа. В случае энергосистем по причине большой территории покрытия, а также сложной иерархии взаимодействия многие из воздействий могут долгое время оставаться невыявленными, что приводит к инцидентам, становящимся впоследствии достоянием общественности. В силу того, что при этом страдает критическая инфраструктура, сведения об инцидентах могут быть отрывочными, противоречивыми, а также, в зависимости от стороны инцидента, преследовать особые политические или экономические цели. Как правило, первоначальные публикации связаны с жалобами рядовых потребителей сервисов на недоступность или ограниченную функциональность, и только спустя некоторое время возможно разглашение сведений о причинах, а также оценка последствий. В таблице приведены наиболее значимые инциденты, повлекшие за собой значительное возмущение

риска для жизни и здоровья населения, а также приведшие к массовому недоотпуску электроэнергии.

Инциденты в электрических сетях и на электроэнергетических предприятиях, вызванные злонамеренным воздействием на информационную инфраструктуру

Инцидент	Месяц, год	Описание события
1	2	3
Отключение АЭС Дэвис-Бесс, США	Январь, 2003	Во время проведения обслуживания АЭС Дэвис-Бесс была полностью обесточена. Причина – невозможность использования автоматической системы мониторинга безопасности из-за поражения вирусом («червем») Slammer
Отключение АЭС Хатч, США	Март, 2008	Аварийное отключение АЭС Хатч (штат Джорджия) по причине невозможности обновления программного обеспечения, установленного на единственном компьютере диспетчера
«Червь» Stuxnet	Июль, 2010	«Червь» Stuxnet, разработанный специально для поражения установок для обогащения урана в Иране. Распространялся по компьютерам сторонних пользователей, не оказывая деструктивного воздействия
Блэкаут в Венесуэле	Март, 2019	Предположительно, кибератака на систему автоматического контроля ГЭС «Эль Гури» (по заявлениям правительства Венесуэлы) привела к отключению оборудования ГЭС и прекращению электроснабжения почти 80 % потребителей страны [9]
Хакерская атака на очистные сооружения в штате Флорида, США	Февраль, 2021	Атака по каналам передачи информации привела к получению возможности удаленного управления информационной системой очистных сооружений и станций водоподготовки в штате. Целью воздействия было увеличение введения гидроксида натрия (едкий натр, NaOH) до опасного уровня
Атака через программное обеспечение компании SolarWinds, США	Декабрь, 2020	Вирус, содержащийся в обновлении программного обеспечения компании SolarWinds, позволил получить функции удаленного администрирования применительно к тысячам телекоммуникационных сетей. Жертвами атаки стали Министерство финансов США, Национальное управление по телекоммуникациям и информации, Министерство торговли США, Министерство внутренней безопасности, отдельные компании энергетического сектора в США и Европе

Окончание таблицы

1	2	3
Атака на сетевые объекты критической инфраструктуры Дании	Май, 2023	В результате воздействия многие сети передачи данных оказались отключены от интернета, что ограничило возможность передачи диспетчерской информации в единую энергосистему страны
Похищение данных у компании Schneider Electric	Январь и ноябрь, 2024	Система организации взаимодействия с пользователями и управление корпоративной системой хранения информации были скомпрометированы. В результате взлома были украдены данные проектов и личные данные пользователей
Взлом системы управления плотинной Rizevatnet, Норвегия	Апрель, 2025	Демонстрация уязвимости системы управления по причине простого пароля. Ущерб нанесен не был (спуск воды был увеличен только на 5 %)

Очень часто незамеченным остается вмешательство, направленное исключительно на сбор информации. Например, в контексте атак на конфиденциальность, нацеленных на получение данных об использовании электроэнергии, следует отметить «интеллектуальные» счетчики, установленные у потребителей и являющиеся воплощением концепции IoT (англ. Internet of Things, интернет вещей). Данные счетчики собирают подробную информацию о потреблении электроэнергии несколько раз в час, потенциально раскрывая конфиденциальную информацию, такую как ежедневный распорядок жизни домовладельцев [10, 11]. Знание о режиме присутствия позволяет повысить успешность квартирных краж. Обнаружение утечки данных из схем использования имеет решающее значение в этом сценарии. Предназначенные в первую очередь для уменьшения хищений энергии за счет усовершенствованных алгоритмов выявления аномалий в электропотреблении, многие из «умных» счетчиков, по причине несовершенства программного обеспечения или заведомого упрощения микропроцессорной составляющей для удешевления производства, имеют чрезвычайно низкий уровень защищенности. В связи с этим получение данных со счетчиков, а также возможное перепрограммирование измерительного устройства, направленное на искажение результатов, потенциально реализуемо при незначительных временных затратах с использованием доступных информационных средств. С учетом того, что, как правило, никаких средств, ограничивающих попытки подключения, в «умные» счетчики не встроено, наиболее простой и одновременно выгодной является атака перебором (brute-force).

Отдельно стоит отметить наличие уязвимостей, связанных с наличием сервисных кодов и режимов доступа, предназначенных для первоначальной настройки, а также обслуживания измерительного комплекса в рамках проверки работоспособности и поверки прибора. Доступность размещения информации в интернете привела к тому, что сведения об указанных кодах становятся общеизвестными в течение непродолжительного времени,

приводя к массовому использованию указанной брешы в защищенности функционирования системы учета. В силу универсальности кода, записанного в микропроцессоре измерительного устройства, для нескольких сходных устройств (моделей счетчика) может быть использован общий код доступа.

В мире растет интерес со стороны ресурсоснабжающих компаний к централизованному сбору показаний систем учета. В связи с ограниченной возможностью по прокладке дополнительных линий коммуникаций между средствами учета и системой сбора и обработки информации предпочтение отдается системам беспроводной передачи информации (в радиодиапазонах сотовой связи – для большого радиуса передачи или посредством Wi-Fi для малого), а также системам передачи сигнала непосредственно по электрическим линиям (Power-line communication, PLC). Недостатком обоих указанных видов коммуникации с точки зрения безопасности является использование широко-вещательных технологий передачи сигнала, что позволяет, при некоторых условиях, осуществлять скрытый перехват информации, а также оказывать воздействие, направленное на создание помех, ограничивающих ее передачу.

В отличие от других видов коммуникаций, передача информации в сетях энергетических компаний менее подвержена атакам, совершаемым при помощи методов социальной инженерии. Это связано с тем, что основными участниками обмена информацией выступают информационные системы с минимальным участием человека. Тем не менее увеличение функциональности таких устройств за счет добавления интерпретаторов языков (например, Python) приводит к появлению возможности стороннего нелегитимного воздействия на работу за счет подмены компонента системы в результате целенаправленного воздействия на репозиторий хранения исходного кода [12]. С учетом роста количества задействованных программных средств, а также децентрализованного подхода к их разработке увеличивается количество потенциальных путей вмешательства в программный механизм работы многих современных средств, применяемых в энергетике [13].

Отдельно стоит отметить участвовавшие случаи интеграции сторонних неавторизованных элементов в системы сбора и обработки телеметрической информации, что вызвано желанием части потребителей уменьшить величину платежей за электрическую энергию, а также стремлением некоторых государств иметь доступ к критической инфраструктуре страны-конкурента [14]. Как правило, это связано с тем, что массовое производство электронных компонентов, особенно с использованием современных технологических процессов, сосредоточено в странах Юго-Восточной Азии. Страны-заказчики определяют только общие технические требования к изделию и намного реже являются разработчиками принципиальных схем. По этой причине факт наличия нелегитимных компонентов может долго оставаться невыявленным, что увеличивает как риски воздействия со стороны разработчика указанного устройства (или непосредственного заказчика данного воздействия), так и со стороны других субъектов, получивших доступ к информации о наличии определенной уязвимости. В данном случае наличие уязвимости, заложенной непосредственно в схемотехнику электронного компонента, делает ее устранение практически невозможным.

Статистика атак, учитывающая невосприимчивые факторы, отмечает рост числа атак на топливно-энергетический комплекс Российской Федерации на 40 % за

первое полугодие 2025 года [15]: Из них 67 % атак начинаются с фишинговых писем, направленных на получение доступа к информационной инфраструктуре предприятия;

41 % атак направлены на промышленный шпионаж с целью получения данных исследований и перспективных разработок для последующей их перепродажи или использования инсайдерской информации на рынке ценных бумаг;

25 % нацелены на финансовые данные для получения прибыли на рынке акций;

17 % совершаются хакерами и носят деструктивный характер, направленный на достижение определенных политических или социальных целей;

17 % имеют смешанную мотивацию.

Большая часть технических мероприятий, направленных на злонамеренное воздействие на электрические сети, может быть отнесена к одному из указанных ниже типов:

1. Атака с внедрением данных в энергосистемы, известная также как манипуляция данными. Это тип кибератаки, заключающийся во внедрении ложных или вредоносных данных в системы управления энергосистемой. Целью данных атак является нарушение нормальной работы энергосистемы и потенциальное повреждение системы. Такие атаки могут принимать различные формы, но обычно они заключаются в том, что злоумышленник внедряет ложные или вредоносные данные в системы управления энергосистемой, чтобы ввести операторов в заблуждение или вызвать сбой в работе системы. Например, злоумышленник может внедрить ложные данные о неисправности в элементе энергосистемы. При ограниченных возможностях контроля и мониторинга оперативно-диспетчерский персонал предпримет действия, направленные на устранение неисправности, а также на предотвращение возможного негативного развития ситуации, вызванной отказом. В этом случае часть энергосистемы может быть выведена из эксплуатации. Атаки с внедрением данных обнаружить сложно, поскольку они часто подразумевают вброс небольшого количества ложных данных в системы управления энергосистемой. Их также сложно предотвратить, поскольку это требует высокого уровня доступа к системам управления энергосистемой. Операторам энергосистем необходимо внедрять надежные меры контроля и резервирования передачи информации для защиты от подобных атак.

2. Атака с изменением настроек релейной защиты в энергосистемах. Это специфический тип кибератаки, включающий изменение уставок срабатывания различных защитных реле – электрических и электронных устройств, которые используются для автоматического обнаружения и реагирования на аномальные состояния в энергосистеме, такие как короткие замыкания, перегрузка, отключение напряжения. Защитные реле являются важным компонентом системы защиты энергосистемы, поскольку помогают обеспечить стабильность и надежность работы сети. При атаке с изменением настроек реле злоумышленник может попытаться манипулировать их настройками, чтобы нарушить нормальную работу энергосистемы. Например, он может изменить настройки реле таким образом, чтобы они не реагировали на определенные типы неисправностей или реагировали несоответствующим образом. Это может привести к масштабным отключениям электроэнергии и другим сбоям в энергосистеме. Атаки с изменением настроек реле сложно обнаружить, так как в современных системах возможность изменения уставок заложена в концепцию SMART GRID, направленную на повышение степени автоматизации, а также на регулирование режимов с минимальным воздействием

человека. В современных микропроцессорных реле настройка уставок производится после их расчета на основании данных о режиме. Даже небольшое изменение кратности тока срабатывания может привести к отключению при токах перегрузки вместо тока однофазного короткого замыкания.

3. Атака с передачей команд на отключение. При таком типе атаки управляемый орган (реле, контактор) размыкает цепь командой, полученной из удаленного местоположения. Целью в данном случае является отключение силового коммутационного оборудования, что может привести к лавинообразным масштабным отключениям электроэнергии и другим сбоям в энергосистеме. Атаки достаточно сложно выявить, так как, как правило, подобные команды управления шифруются недостаточно эффективно и потому легко могут быть воспроизведены злоумышленниками.

Таким образом, унификация обмена данными в системах передачи критической информации, построенная вокруг поддержки протоколов наименее защищенных компонентов (поддерживающих только слабые виды шифрования в силу невысокой вычислительной мощности) негативно сказывается на общей информационной защищенности энергосистемы. Ограничение поставок электронных компонентов, вызванное санкционным давлением на РФ в 2022–2025 годах, а также отсутствие или ограниченная представленность на рынке этих компонентов российского производства приводят к вынужденному снижению темпов внедрения «цифровых подстанций».

Анализ публикаций [16–18] показывает, что тема защиты от неавторизованного и деструктивного воздействия на энергетические коммуникации регулярно поднимается авторитетными организациями, однако, в силу гетерогенности всего информационного пространства систем управления энергетикой (в первую очередь – ее электро-энергетической составляющей), вопрос может быть решен только в рамках разработки унифицированных международных стандартов, в которых основными приоритетами станут именно надежность и безопасность. Некоторые подвижки в этой области позволяют надеяться на то, что в ближайшие годы при планировании строительства новых и модернизации существующих систем управления в энергетике предпочтения по выбору технических решений сместятся в сторону высоконадежных (во всех отношениях) решений. Открытость архитектуры и соответствие стандартам позволят добиться снижения рисков негативных последствий по причине доступности аудита для выявления возможных непреднамеренных, а также специально внедренных уязвимостей. В силу отсутствия необходимости в чрезвычайно развитых технологических процессах для производства подобных электронных компонентов выпуск подобных микропроцессоров может быть налажен и на базе технологий, имеющих в доступе у многих стран (технологические нормы проектирования – от 65 до 130 нм), включая технологические мощности Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sorebo G.N., Echols M.C. Smart Grid Security: An End-to-End View of Security in the New Electrical Grid. New York: Taylor & Francis, 2011.
2. Wang W., Lu Zh. Cyber security in the Smart Grid: Survey and challenges // *Computer Networks*. № 57. P.1344–1371. DOI:10.1016/j.comnet.2012.12.017
3. Киберугрозы и кибербезопасность в электроэнергетических системах / Н.И. Воропай [и др.]. *Электроэнергетика глазами молодежи – 2019: Материалы юбилейной*

X Международной научно-технической конференции, Иркутск, 16–20 сентября 2019 года. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. Т. 1. С. 32–37.

4. Белоус А.И. Кибербезопасность объектов топливно-энергетического комплекса. Концепции, методы и средства обеспечения. Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 644 с.

5. Мамонова Е. Сектор энергетики стал одной из основных мишеней кибератак // *Российская газета*. 2022. № 105 (8753). С.4.

6. Осак А.Б., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я. Кибербезопасность объектов электроэнергетики как фактор надежности ЭЭС. *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Сборник научных статей. Вып. 66. Актуальные проблемы надежности систем энергетики*. Минск: БНТУ, 2015. DOI:10.13140/RG.2.1.2557.7849.

7. Ярушевский Д. Кибербезопасность объектов электроэнергетики: вчера, сегодня, завтра // *Безопасность объектов ТЭК*. 2017. Т. 1. С. 98–101.

8. Potential Smart Grid Vulnerabilities to Cyber Attacks: Current Threats and Existing Mitigation Strategies / Bishowjit Paul [et al.] // *Heliyon*. Vol. 10. Iss.19. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37980> (дата обращения: 19.11.2025).

9. Новиков С. Почему произошла авария на ГЭС в Венесуэле // *Российская газета*. 2019. 10 марта. № 52 (7810). С. 2.

10. Attacks, Vulnerabilities and Security Requirements in Smart Metering Networks // *KSII Transactions on Internet and Information Systems*. Vol. 9. No. 4. Korean Society for Internet Information (KSII), 30 Apr. 2015. DOI:10.3837/tiis.2015.04.013.

11. Silva J.F.R. da. A Fast Attack against a Smart Meter Authentication Protocol. URL: <https://doi.org/10.7763/IPCBE> (дата обращения: 19.01.2026).

12. Сурабекянц С. Миллионы компьютеров оказались под угрозой взлома из-за критической уязвимости, связанной с Python // *3Dnews*. 2025. 10 марта. URL: <https://3dnews.ru/1119504/millioni-kompyutеров-okazalis-pod-ugrozoy-vzloma-izza-kriticheskoy-u-yazvimosti-svyazannoy-s-python> (дата обращения: 19.11.2025).

13. Podkuiko D. Vulnerabilities in Advanced Metering Infrastructure. Master of Science degree thesis (Computer Science and Engineering). USA. The Pennsylvania State University. 2012. 55 p. URL: https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/1591 (дата обращения: 19.11.2025).

14. Kenn J.K. Cybersecurity in Electrical Power Systems Engineering: A Practical Guide and Applications to Protecting Smart Grids, SCADA, and Critical Power Infrastructure from Cyber Attacks (Kindle Edition). Amazon. 2025. 122 p.

15. Вяткина А., Осипова А. Актуальные киберугрозы: I–II кварталы 2025 года // *Positive Technologies*. 28 августа 2025. URL: <https://ptsecurity.com/research/analytics/aktual-nye-kiberugrozy-i-ii-kvartaly-2025-goda/> (дата обращения: 19.11.2025).

16. Kreso I. Cyber Threats and Vulnerability Mapping in the Energy Sector: Laying the Groundwork for smart Grid Resilience // *ACIG*. Vol. 4. No. 1, 2025. DOI: 10.60097/ACIG/211124.

17. Critical Infrastructure Annual Risk Review. Third Edition. November 2025. Australian Government. Department of Home Affairs. Critical infrastructure security centre. URL: <https://www.cisc.gov.au/resources-subsite/Documents/critical-infrastructure-annual-risk-review-2025.pdf> (дата обращения: 19.11.2025).

18. IEA (2025). World Energy Outlook 2025. IEA. Paris. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025> (дата обращения: 19.11.2025).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОРНЕЕВ Константин Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: Energy-tver@mail.ru

КОРНЕЕВ Виктор Константинович – студент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 119049, Россия, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1. E-mail: korneyev.viktor@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Корнеев К.Б., Корнеев В.К. Обеспечение информационной безопасности в электроэнергетике // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2026. № 1 (29). С. 50–58.

ENSURING INFORMATION SECURITY IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

Korneev K.B.¹, Korneev V.K.²

¹ *Tver State Technical University (Tver),*

² *University of Science and Technology «MISIS» (Moscow)*

Abstract. The increasing use of information technology in the industrial sector, and most importantly in such critical area as energy production, necessitates the development of systems to control the flow of information collected, transmitted, and processed at power enterprises. While transferring information storage and processing to the “cloud” improves reliability and processing speed, it also makes the system more vulnerable to illegitimate external influence. The integration of highly connected Internet of Things (IoT) network elements can also negatively impact information security.

Keywords: Electric power industry, information security, cyberattack, cybercrime, reliability.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KORNEEV Konstantin Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: Energy-tver@mail.ru

KORNEEV Viktor Konstantinovich – student, Federal State Educational Institution of Higher Education «National Research Technological University «MISIS», 4, Leninsky Prospekt, building 1, Moscow, 119049, Russia. E-mail: korneyev.viktor@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Korneev K.B., Korneev V.K. Ensuring information security in the electric power industry// Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2026. No. 1 (29), pp. 50–58.

УДК 537.311.6

ИСКУССТВЕННАЯ (ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ) УПРУГОСТЬ**В.Д. Павлов***Владимирский электромеханический завод (г. Владимир)*

© Павлов В.Д., 2026

Аннотация. В отличие от квазиупругих объектов, для которых закон Гука выполняется лишь в отношении малых деформаций, под искусственной упругостью следует понимать величину, удовлетворяющую закону Гука при любых возможных перемещениях. Искусственная упругость может быть компонентом систем автоматики, а также механического линейного гармонического осциллятора и колебательных устройств с однородными элементами. Описан маятник $k_L m$, который в равной мере можно рассматривать как электрический колебательный контур $C_m L$. В электромеханической $k_L m$ ($C_m L$)-системе могут возникать свободные гармонические колебания, обусловленные взаимным преобразованием кинетической энергии груза в энергию магнитного поля катушки индуктивности. Искусственная упругость принципиально отличается от аналогии между коэффициентом упругости и индуктивностью, поскольку электромагнитные аналоги неприменимы в качестве элементов механических систем. Искусственная упругость может использоваться в устройствах автоматики.

Ключевые слова: упругость, индуктивность, балансировка, регулирование, маятник, контур.

DOI: 10.46573/2658-7459-2026-1-59-63**ВВЕДЕНИЕ**

В классической механике механическая величина «коэффициент упругости k » определяется законом Гука. «Натуральная» упругость обуславливается свойствами вещества упругого объекта (под последним обычно имеется в виду пружина) и его формой.

В отличие от квазиупругих объектов, для которых закон Гука выполняется лишь в отношении малых деформаций:

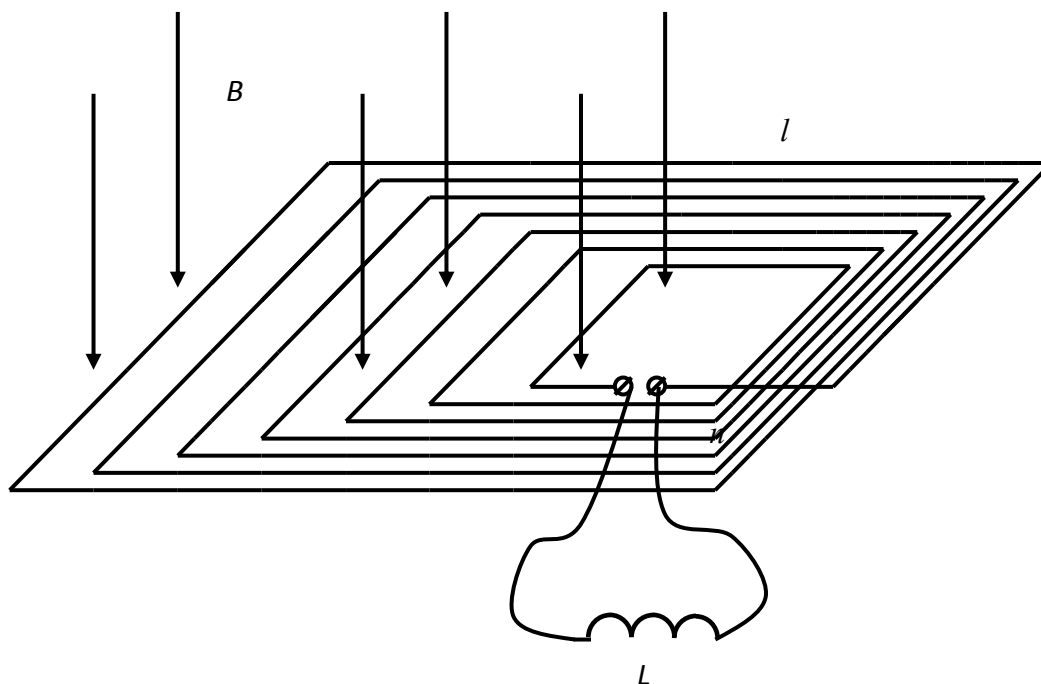
$$dF = -kdx,$$

под искусственной упругостью следует понимать величину, удовлетворяющую закону Гука при любых возможных перемещениях.

Искусственная упругость может быть компонентом систем автоматики, а также механического линейного гармонического осциллятора и колебательных устройств с однородными элементами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рисунке представлено устройство, обладающее свойствами искусственной или индуктивной упругости. Количество проводящих рамок – n , длина их активной части – l , индукция магнитного поля – B [1–3], индуктивность катушки – L [4]. Масса, активное сопротивление и индуктивность рамок не учитываются.



Устройство, обладающее искусственной, или индуктивной упругостью

При перемещении устройства в рамках возникает ЭДС электромагнитной индукции $e_i = -Blndx / dt$ [5–8]. В соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$Bl n \frac{\partial x}{\partial t} = -L \frac{\partial i}{\partial t}.$$

Здесь $-L \partial i / \partial t$ – напряжение на катушке. Пусть для компактности

$$Bl n = y^{0,5}.$$

Интеграл исходного выражения

$$y^{0,5} \int_0^t \frac{\partial x}{\partial t} dt = -L \int_0^t \frac{\partial i}{\partial t} dt,$$

$$y^{0,5} x = -Li.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С учетом последнего равенства закон Ампера [9] запишется в виде

$$F = y^{0,5} i = -\frac{y}{L} x = -k_L x,$$

где $k_L = \frac{y}{L}$ – коэффициент индуктивной упругости, найденный с использованием закона Гука.

Это и есть искусственная (электромагнитная) упругость.

В математическом отношении данное выражение идентично формуле для упругой индуктивности

$$L_k = \frac{y}{k}.$$

Искусственная (индуктивная) упругость в сочетании с инертным грузом может образовывать маятник, частота которого

$$\omega = \sqrt{\frac{k_L}{m}} = \sqrt{\frac{y}{Lm}}.$$

Сравнение данной формулы с выражением для частоты электрического колебательного контура

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

позволяет получить формулу для искусственной, или инертной емкости:

$$C_m = \frac{m}{y},$$

из которой, в свою очередь, выводится искусственная, или емкостная масса [10]:

$$m_C = yC.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный выше $k_L m$ -маятник в равной мере можно рассматривать как $C_m L$ -электрический колебательный контур.

В электромеханической $k_L m$ ($C_m L$)-системе могут возникать свободные гармонические колебания, обусловленные взаимным преобразованием кинетической энергии груза в энергию магнитного поля катушки индуктивности.

Искусственная упругость принципиально отличается от аналогии между коэффициентом упругости и индуктивностью, поскольку электромагнитные аналоги не применяются в качестве элементов механических систем, и может использоваться в устройствах автоматики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.П. Свойства магнитных монополей и силовые линии магнитного поля // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 3 (27). С. 53–60. DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-53-60
2. Павлов В.Д. Интерпретация результатов измерения кванта магнитного потока // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 1 (25). С. 61–67. DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-61-67
3. Попов И.П. Рассеяние магнитного потока в трансформаторах // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 4 (8). С. 81–88. DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-81-88
4. Попов И.П. Трииндуктивный осциллятор // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 1 (13). С. 50–55. DOI: 10.46573/2658-7459-2022-50-55
5. Безденежных В.И. Мгновенное значение момента, развиваемого синхронным генератором при индуктивной и емкостной нагрузке // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 2 (26). С. 36–39. DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-36-39
6. Попов И.П. Амплитудно-частотные особенности режимов нагрузки синхронной электрической машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 49–56.
7. Попов И.П. Электромеханический маховик с искусственным (емкостным) моментом инерции // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 58–63. DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-58-63
8. Попов И.П. Влияние сети на реактивную мощность // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 1 (17). С. 55–60. DOI: 10.46573/2658-7459-2023-1-55-60
9. Попов И.П. Приоритет электродинамики над механикой на примере второго закона Ньютона // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 3 (23). С. 62–69. DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-62-69
10. Павлов В.Д. Электромеханический аккумулятор // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 3 (27). С. 47–53. DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-47-53

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ПАВЛОВ Валентин Дмитриевич – кандидат технических наук, начальник научно-информационного отдела, Владимирский электромеханический завод, 600901, Россия, г. Владимир, ул. Ноябрьская, д. 127. E-mail: pavlov.val.75@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Павлов В.Д. Искусственная (электромагнитная) упругость // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2026. № 1 (29). С. 59–63.

ARTIFICIAL (ELECTROMAGNETIC) ELASTICITY

V.D. Pavlov

Vladimir Electromechanical Plant (Vladimir)

Abstract. Unlike quasi-elastic objects, for which Hooke's law is fulfilled only for small deformations, artificial elasticity should be understood as a value that satisfies Hooke's law for any possible movements. Artificial elasticity can be a component of automation systems, as well as a mechanical linear harmonic oscillator and oscillating devices with uniform elements. A pendulum kLm is described, which can equally be considered as a CmL electric oscillatory circuit. In the considered electromechanical kLm (CmL) system, free harmonic vibrations can occur due to the mutual conversion of the kinetic energy of the load into the energy of the magnetic field of the inductance coil. Artificial elasticity is fundamentally different from the analogy between the coefficient of elasticity and inductance, since electromagnetic analogues cannot be used as elements of mechanical systems. Artificial elasticity can be used in automation devices.

Keywords: elasticity, inductance, balancing, adjustment, pendulum, contour.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

PAVLOV Valentin Dmitrievich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Scientific and Information Department, Vladimir Electromechanical Plant, 127, Noyabrskaya st., Vladimir, 600901, Russia. E-mail: pavlov.val.75@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Pavlov V.D. Artificial (electromagnetic) elasticity // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2026. No. 1 (29), pp. 59–63.

УДК 534.014.4, 537.862

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЦЕПИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С УПРУГОЙ НАГРУЗКОЙ С ПРОЦЕССОМ ЗАРЯДКИ КОНДЕНСАТОРА

*И.П. Попов**Курганский государственный университет (г. Курган)*

© Попов И.П., 2026

Аннотация. Электромеханические преобразователи могут иметь различный характер реактивности в зависимости от вида их механической нагрузки. Целью работы является установление характера переходного процесса при подключении пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой к источнику постоянного напряжения. Рассмотрены прямой и обратный пьезоэффекты, на которых основана работа преобразователя. При подключении пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой к источнику постоянного напряжения происходит переходный процесс, неотличимый от процесса зарядки конденсатора. Полученные результаты могут быть использованы при разработке автоматизированных систем.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, переходный процесс, упругая нагрузка, постоянное напряжение.

DOI: 10.46573/2658-7459-2026-1-64-68

ВВЕДЕНИЕ

Электромеханические преобразователи могут иметь различный характер реактивности в зависимости от вида их механической нагрузки [1–5].

Целью работы является установление характера переходного процесса при подключении пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой к источнику постоянного напряжения (рис. 1).

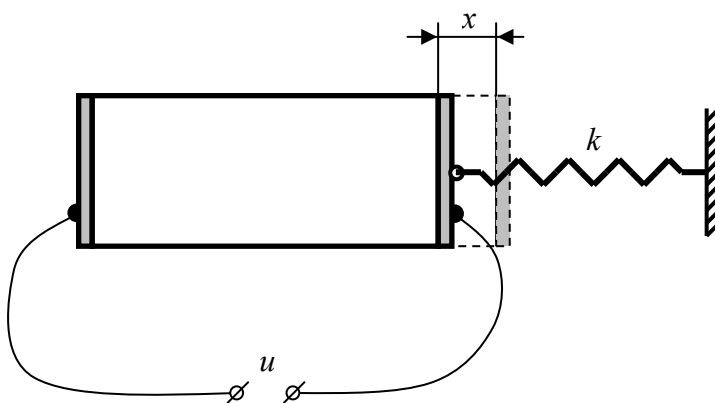


Рис. 1. Пьезоэлектрический преобразователь с упругой нагрузкой

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа преобразователя основана на прямом и обратном пьезоэффектах. Прямой пьезоэффект проявляется в том, что на обкладках пьезоэлемента при его деформации x появляется электрический заряд q [6–8]:

$$q = d_1 x,$$

где d_1 – пьезомодуль. Обратный пьезоэффект заключается в том, что при подаче на обкладки напряжения u пьезоэлемент деформируется и развивает усилие F [9, 10]:

$$F = d_2 u.$$

Пусть активное сопротивление $R \neq 0$ и коэффициент трения $b \neq 0$, начальные условия $x(0) = x_0$.

Уравнение механического равновесия запишется в виде

$$d_2 u_{\text{п}} = kx + b \frac{dx}{dt}. \quad (1)$$

Баланс напряжений в соответствии со вторым законом Кирхгофа с учетом (1) имеет вид:

$$\begin{aligned} U = u_{\text{п}} + Ri &= \frac{k}{d_2} x + \frac{b}{d_2} \frac{dx}{dt} + Rd_1 \frac{dx}{dt}, \\ \frac{dx}{dt} + \frac{k}{b + Rd_1 d_2} x &= \frac{Ud_2}{b + Rd_1 d_2}, \end{aligned} \quad (2)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение дифференциального уравнения (2) ищется в виде

$$x = x_1 + x_2,$$

где

$$\begin{aligned} x_1 &= C_1 e^{-\frac{k}{b+Rd_2}t}, \\ x_2 &= C_2. \end{aligned}$$

При подстановке x_2 в выражение (2) получим:

$$0 + \frac{k}{b + Rd_2} C_2 = \frac{Ud_2}{b + Rd_2},$$

$$C_2 = \frac{Ud_2}{k},$$

$$x = C_1 e^{-\frac{k}{b+Rz}t} + \frac{Ud_2}{k},$$

$$C_1 = x_0 - \frac{Ud_2}{k},$$

$$x = \left(x_0 - \frac{Ud_2}{k} \right) e^{-\frac{k}{b+Rz}t} + \frac{Ud_2}{k}.$$

Производная последнего выражения

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \frac{i}{d_1} = \left(\frac{Ud_2}{b+Rz} - \frac{x_0 k}{b+Rz} \right) e^{-\frac{t}{z/k(b/z+R)}} = \\ &= \left(\frac{Ud_2}{b+Rz} - \frac{d_2 x_0 k / d_2}{b+Rz} \right) e^{-\frac{t}{C_k(R_b+R)}}, \\ i &= \left(\frac{U}{b/z+R} - \frac{kx_0/d_2}{b/z+R} \right) e^{-t/\tau} = \\ &= \frac{U-U_0}{R_b+R} e^{-t/\tau}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь фрикционное сопротивление R_b и постоянная времени электрической цепи τ определяются по формулам:

$$R_b = \frac{b}{z},$$

$$\tau = C_k (R_b + R) = \frac{b+Rz}{k}.$$

Характер протекания тока идентичен процессу зарядки конденсатора при включении источника постоянного напряжения. Решению (3) соответствует электрическая схема пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой, представленная на рис. 2.

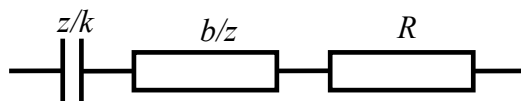


Рис. 2. Электрическая схема пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой

При $U = 0$ режим аналогичен процессу разряда конденсатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при подключении пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой к источнику постоянного напряжения происходит переходный процесс, аналогичный процессу зарядки конденсатора.

Полученные результаты могут использоваться при разработке автоматизированных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.П. Амплитудно-частотные особенности режимов нагрузки синхронной электрической машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 49–56.
2. Безденежных В.И. Мгновенное значение момента, развиваемого синхронным генератором при индуктивной и емкостной нагрузке // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 2 (26). С. 36–39. DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-36-39
3. Попов И.П. Электромеханический маховик с искусственным (емкостным) моментом инерции // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 58–63. DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-58-63
4. Павлов В.Д. Электромеханический аккумулятор // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 3 (27). С. 47–53. DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-47-53
5. Попов И.П. Влияние сети на реактивную мощность // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 1 (17). С. 55–60. DOI: 10.46573/2658-7459-2023-1-55-60
6. Попов И.П. Полный учет энергии электростатического поля заряженных сфер // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 1 (21). С. 45–56. DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-45-56
7. Попов И.П. Расчет полной энергии электростатического поля // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2020. Т. 2. № 392. С. 107–114. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-107-114
8. Попов И.П. Запасаемая электростатическая энергия // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2020. № 33. С. 195–210. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.12
9. Попов И.П. Приоритет электродинамики над механикой на примере второго закона Ньютона // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 3 (23). С. 62–69. DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-62-69

10. Попов И.П. Применение методов классической механики к электрическим зарядам // *Труды МАИ*. 2021. № 119. URL: <http://mai.ru/> (дата обращения: 09.04.2026). DOI: 10.34759/trd-2021-119-01

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ПОПОВ Игорь Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов, ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», 640020, Россия, г. Курган, ул. Советская, д. 63/4. E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Попов И.П. Сопоставление переходного процесса в цепи пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой с процессом зарядки конденсатора // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2026. № 1 (29). С. 64–68.

COMPARISON OF TRANSIENT PROCESS IN PIEZOELECTRIC CONVERTER CIRCUIT WITH ELASTIC LOAD WITH CAPACITOR CHARGING PROCESS

I.P. Popov

Kurgan State University (Kurgan)

Abstract. Electromechanical converters can have different types of reactance depending on the type of their mechanical load. The purpose of this work is to determine the nature of the transient process when a piezoelectric converter with an elastic load is connected to a constant voltage source. The direct and reverse piezoelectric effects, which are the basis for the converter's operation, are considered. When a piezoelectric converter with an elastic load is connected to a constant voltage source, a transient process occurs that is indistinguishable from the charging process of a capacitor. The results obtained can be used in the development of automated systems.

Keywords: electromechanical converters can have different reactivity depending on the type of their mechanical load. piezoelectric transducer, transient, elastic load, *DC* voltage.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

POPOV Igor Pavlovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Mechanical Engineering, Machine Tools and Instruments, Kurgan State University, 63/4, Sovetskaja St., Kurgan, 640020, Russia. E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Popov I.P. Comparison of transient process in piezoelectric converter circuit with elastic load with capacitor charging process // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2026. No. 1 (29), pp. 64–68.

УДК 629.7.052

ТЕОРЕМА О ПЛОСКОСТЯХ n -СИММЕТРИИ ВЫПУКЛОГО ТЕЛА*Ал.А. Шум¹, А.М. Ветошкин²*¹ *Тверской государственный технический университет (г. Тверь),*² *Мытищинский филиал Московского государственного
технического университета им. Н.Э. Баумана
(г. Мытищи, Московская область)*

© Шум Ал.А., Ветошкин А.М., 2026

Аннотация. Рассмотрено понятие момента n -го порядка выпуклого тела относительно заданной плоскости. Плоскость является плоскостью n -симметрии в случае, если моменты n -го порядка двух подтел, на которые исходное тело делится этой плоскостью, одинаковы. Установлено, что момент n -го порядка выпуклого тела относительно плоскости Π , которая проводится параллельно данной плоскости, достигает наименьшего значения тогда, когда Π представляет собой плоскость $(n - 1)$ -симметрии данного тела.

Ключевые слова: момент n -ного порядка, плоскость n -симметрии, плоскость полумасс, выпуклое тело, функция плотности, масса, центр масс, центр полумасс, электрическая машина.

DOI: 10.46573/2658-7459-2026-1-69-76

ВВЕДЕНИЕ

Выбор методов и технологий при изготовлении и балансировке детали электрической машины требует учета распределения массы внутри рассматриваемой детали. Такой выбор может быть непростым, поскольку спектр технологий и методов механической и физико-технической обработки деталей машин весьма разнообразен (см., например, работы [1–13]). Между тем, поскольку распределение массы внутри детали определяется соответствующей функцией плотности, представляет интерес изучение этой функции и тех ее свойств, которые связаны с тем или иным видом симметрии. В статье [22] предметом исследования была одномерная деталь (*линейный стержень*), а соответствующая функция плотности являлась функцией одной переменной. В работах [14, 16, 17, 20, 23] рассматривались плоские детали (*пластины*), и соответствующая функция плотности была функцией двух переменных. В статьях [15, 18, 19, 21] в качестве деталей рассматривались уже *пространственные тела*, и функция плотности представляла собой функцию трех переменных. Настоящая работа продолжает исследования пространственных тел, однако она опирается на результаты, полученные при изучении плоских пластин. Доказанная в работе [22] теорема о линиях n -симметрии плоской пластины, переносится в данной работе на случай плоскостей n -симметрии пространственного тела.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБОСНОВАНИЯ

Рассматривается трехмерное евклидово пространство с заданной прямоугольной декартовой системой координат. Под *областью* понимается замкнутая область этого пространства, ограниченная некоторой поверхностью (*границей*), которая также считается частью области. Точки области, не принадлежащие границе, являются *внутренними*. Область называется *выпуклой*, если всякая прямая, проведенная через любую ее внутреннюю точку, пересекает границу этой области ровно в двух точках. Область V_1 называется *подобластью* области V , если $V_1 \subseteq V$.

Область V вместе с определенной в этой области непрерывной неотрицательной функцией трех переменных $f(x, y, z)$ называется *телом* D , при этом функция $f(x, y, z)$ представляет собой *функцию плотности* тела D . Подобласть области V вместе с соответствующим ограничением функции плотности $f(x, y, z)$ это *подтело* тела D . Масса тела D , в соответствии с традиционным определением, это

$$m(D) = \iiint_V f(x, y, z) dx dy dz .$$

Следует отметить, что функция плотности $f(x, y, z)$ определением объявлена неотрицательной, а значит, в некоторых точках области V она может обращаться в нуль. Однако в настоящей статье (так же, как и в работе [18]) предполагается выполненным обязательное дополнительное условие: масса самого тела D , а также масса всякого его подтела должны быть больше нуля.

Тело D является *выпуклым*, если соответствующая область V выпукла. Отметим, что в рамках данной статьи рассматриваются выпуклые тела.

Пусть имеются плоскость Π и тело D с областью V и функцией плотности $f(x, y, z)$ (рис. 1). В соответствии с определениями из работы [18] *моментом n -го порядка тела D относительно плоскости Π* называется

$$M_n(D) = \iiint_V (r(x, y, z))^n f(x, y, z) dx dy dz ,$$

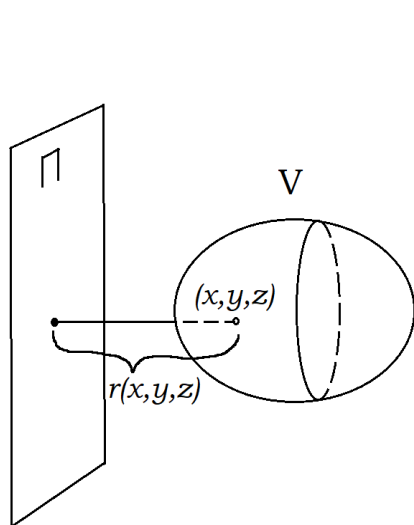
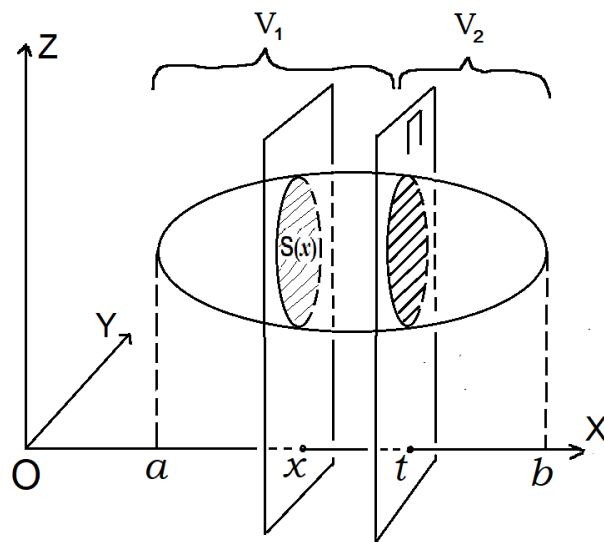
где n – произвольное неотрицательное целое число, а $r(x, y, z)$ – расстояние от точки (x, y, z) до плоскости Π (можно заметить, что значение момента $M_n(D)$ не зависит от выбора системы координат, поскольку функция $f(x, y, z)$ и функция $r(x, y, z)$ при заданной плоскости Π являются функциями точки тела).

Момент нулевого порядка тела D не зависит от положения плоскости Π и равен массе тела D : $M_0(D) = \iiint_V (r(x, y, z))^0 f(x, y, z) dx dy dz = \iiint_V f(x, y, z) dx dy dz = m(D)$.

Момент первого порядка тела D относительно плоскости Π есть *статический момент* тела D относительно плоскости Π : $M_1(D) = \iiint_V r(x, y, z) f(x, y, z) dx dy dz$.

Момент второго порядка тела D относительно плоскости Π есть *момент инерции* тела D относительно плоскости Π : $M_2(D) = \iiint_V (r(x, y, z))^2 f(x, y, z) dx dy dz$.

Пусть теперь плоскость Π делит тело D на два подтела D_1 и D_2 с областями соответственно V_1 и V_2 так, как это показано на рис. 2. В соответствии с определениями, рассмотренными в работе [18], плоскость Π является *плоскостью n -симметрии тела D* , если $M_n(D_1) = M_n(D_2)$. Таким образом, плоскость представляет собой *плоскость n -симметрии тела*, если она делит его на два подтела так, что моменты n -го порядка этих подтел относительно данной плоскости одинаковы.

Рис. 1. Плоскость Π и область V Рис. 2. Плоскость Π и области V_1 и V_2

Как отмечено в [18], плоскости 0-симметрии тела (делящие его на два подтела одинаковой массы) представляют собой *плоскости полумасс*, а плоскости 1-симметрии (делящие его на два подтела с равными статическими моментами) представляют собой *плоскости равновесия*. Плоскости 2-симметрии тела – это плоскости, которые делят тело на два подтела с равными моментами инерции. Точка пересечения всех плоскостей n -симметрии тела является *центром n -симметрии данного тела*. Таким образом, центр 0-симметрии тела оказывается его *центром полумасс*, а центр 1-симметрии тела – его *центром масс*. Как установлено в [15], центр 1-симметрии всегда существует, в то время как центр 0-симметрии может не существовать. Там же показано, что в случае, когда существуют оба эти центра симметрии, они могут не совпадать.

В работе [18] установлено, что для каждого целого неотрицательного числа n , любого тела D и произвольно проведенной плоскости существует единственная *плоскость n -симметрии тела D* , параллельная заданной плоскости.

Цель настоящей работы – доказать, что справедлива следующая

Теорема. Момент n -ного порядка (при $n > 0$) выпуклого тела D относительно плоскости Π , проводимой параллельно заданной плоскости, достигает наименьшего значения тогда, когда плоскость Π представляет собой плоскость $(n - 1)$ -симметрии тела D .

Для доказательства теоремы понадобится следующая техническая лемма, установленная в работе [22]:

Лемма. Если функция $f(x)$ непрерывна на отрезке $[a; b]$ и $n > 0$, то

$$a) \left(\int_a^t (t-x)^n f(x) dx \right)' = n \int_a^t (t-x)^{n-1} f(x) dx;$$

$$б) \left(\int_b^t (x-t)^n f(x) dx \right)' = -n \int_b^t (x-t)^{n-1} f(x) dx.$$

Доказательство теоремы.

Не ограничивая общности, можно считать, что та плоскость, параллельно которой проводится плоскость Π , есть координатная плоскость OYZ заданной в пространстве прямоугольной декартовой системы координат. Пусть плоскость Π , разбивающая тело D на два подтела D_1 и D_2 с областями соответственно V_1 и V_2 , проходит через точку t на оси OX (так, как это показано на рис. 2). Тогда момент n -го порядка тела D относительно плоскости Π может быть представлен следующим образом:

$$\begin{aligned} M_n(D) &= M_n(D_1) + M_n(D_2) = \\ &= \iiint_{V_1} (r(x, y, z))^n f(x, y, z) dx dy dz + \iiint_{V_2} (r(x, y, z))^n f(x, y, z) dx dy dz = \\ &= \iiint_{V_1} |x-t|^n f(x, y, z) dx dy dz + \iiint_{V_2} |x-t|^n f(x, y, z) dx dy dz = \\ &= \iiint_{V_1} (t-x)^n f(x, y, z) dx dy dz + \iiint_{V_2} (x-t)^n f(x, y, z) dx dy dz. \end{aligned}$$

Очевидно, что $M_n(D)$ оказывается функцией, зависящей от переменной $M_n(D) = M_n(t)$.

Запишем теперь эту функцию, обозначив через $S(x)$ сечение области V тела D вертикальной плоскостью $x = \text{const}$:

$$\begin{aligned} M_n(t) &= \int_a^t dx \iint_{S(x)} (t-x)^n f(x, y, z) dy dz + \int_t^b dx \iint_{S(x)} (x-t)^n f(x, y, z) dy dz = \\ &= \int_a^t (t-x)^n dx \iint_{S(x)} f(x, y, z) dy dz + \int_t^b (x-t)^n dx \iint_{S(x)} f(x, y, z) dy dz = \\ &= \int_a^t (t-x)^n F(x) dx + \int_t^b (x-t)^n F(x) dx, \end{aligned}$$

где $F(x) = \iint_{S(x)} f(x, y, z) dy dz$ – функция, непрерывная на отрезке $[a; b]$.

Функция $M_n(t)$ дифференцируема на отрезке $[a; b]$, и ее экстремум на этом отрезке можно отыскивать, используя производную:

$$M_n'(t) = \left(\int_a^t (t-x)^n F(x) dx + \int_t^b (x-t)^n F(x) dx \right)' = \left(\int_a^t (t-x)^n F(x) dx - \int_b^t (x-t)^n F(x) dx \right)'.$$

Применив приведенную выше лемму, получим:

$$\begin{aligned} M_n'(t) &= n \int_a^t (t-x)^{n-1} F(x) dx + n \int_b^t (x-t)^{n-1} F(x) dx = n \int_a^t (t-x)^{n-1} F(x) dx - n \int_t^b (x-t)^{n-1} F(x) dx = \\ &= n \int_a^t (t-x)^{n-1} dx \iint_{S(x)} f(x, y, z) dy dz - n \int_t^b (x-t)^{n-1} dx \iint_{S(x)} f(x, y, z) dy dz = \\ &= n \iiint_{V_1} (t-x)^{n-1} f(x, y, z) dx dy dz - n \iiint_{V_1} (x-t)^{n-1} f(x, y, z) dx dy dz = nM_{n-1}(D_1) - nM_{n-1}(D_2). \end{aligned}$$

Теперь, приравнявая $M_n'(t)$ нулю, находим, что экстремум функции $M_n(t)$ приходится на то положение плоскости Π , при котором $M_{n-1}(D_1) = M_{n-1}(D_2)$, а это значит, что Π является плоскостью $(n-1)$ -симметрии тела D . Очевидно, что данный экстремум единственный для функции $M_n(t)$ на отрезке $[a; b]$. Осталось только подтвердить, что он представляет собой минимум. Это можно сделать, найдя вторую производную функции $M_n(t)$ при помощи той же леммы. Если $n > 1$, то

$$\begin{aligned} M_n''(t) &= \left(n \int_a^t (t-x)^{n-1} F(x) dx + n \int_b^t (x-t)^{n-1} F(x) dx \right)' = \\ &= n(n-1) \int_a^t (t-x)^{n-2} F(x) dx - n(n-1) \int_b^t (x-t)^{n-2} F(x) dx = \\ &= n(n-1) \int_a^t (t-x)^{n-2} F(x) dx + n(n-1) \int_t^b (x-t)^{n-2} F(x) dx = \\ &= n(n-1) \int_a^t (t-x)^{n-2} dx \iint_{S(x)} f(x, y, z) dy dz + n(n-1) \int_t^b (x-t)^{n-2} dx \iint_{S(x)} f(x, y, z) dy dz = \\ &= n(n-1) \iiint_{V_1} (t-x)^{n-2} f(x, y, z) dx dy dz + n(n-1) \iiint_{V_2} (t-x)^{n-2} f(x, y, z) dx dy dz = \\ &= n(n-1)M_{n-2}(D_1) + n(n-1)M_{n-2}(D_2). \end{aligned}$$

Очевидно, что это выражение больше нуля при любом $t \in [a; b]$, что означает вогнутость графика функции $M_n(t)$. Отсюда следует, что рассматриваемый экстремум есть минимум. В случае $n = 1$

$$M_1''(t) = \left(\int_a^t F(x) dx + \int_b^t F(x) dx \right)' = F(t) + F(t) = 2F(t).$$

Функция $F(t)$ в силу своего определения неотрицательна на отрезке $[a; b]$ и притом может обращаться в нуль только в отдельных изолированных точках этого отрезка (последнее есть следствие требования, что масса всякого подтела тела D должна быть больше нуля). Следовательно, тем же свойством обладает и функция $M_1''(t)$. Поэтому функция $M_1'(t)$ строго возрастает и обращается в нуль в единственной точке, а именно в той, для которой выполнено равенство $M_0(D_1) = M_0(D_2)$. Таким образом, и для случая $n = 1$ утверждение теоремы справедливо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теорема, доказанная в настоящей работе для пространственного тела (т. е. для трехмерного случая), имеет свои отчетливые аналоги как для плоской пластины (двумерный случай), так и для линейного стержня (одномерный случай). Соответствующая теорема для линейного стержня установлена в работе [22], а более сложная теорема для случая плоской пластины доказана в работе [23]. Каждая из этих теорем представляет собой значимый результат, устанавливающий нетривиальную связь между симметриями соседних уровней.

Понятие n -симметрии является обобщением рассмотренных в работах [14–16] понятий s -симметрии (которая представляет собой 0-симметрию) и c -симметрии (которая представляет собой 1-симметрию). Теорема, доказанная в данной работе (так же, как и подобные теоремы из источников [22] и [23]), помимо прочего, показывает, как переход к рассмотрению общих понятий n -симметрии, предложенный в работах [16–18], позволяет выявить такие связи между этими видами симметрии, которые не могут быть в полной мере видны при изучении только частных случаев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учебное пособие: в 2 т. / Б.А. Артамонов [и др.]. М.: Высшая школа, 1983. Т. 1. 247 с.
2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
3. Вороничев Н.М., Тартаковский Ж.Э., Генин В.Б. Автоматические линии из агрегатных станков. М.: Машиностроение, 1979. 487 с.
4. Дальский А.М., Гаврилюк В.С. Механическая обработка материалов: учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1981. 266 с.
5. Немилов Е.Ф. Электроэрозионная обработка материалов. Л.: Машиностроение, 1983. 160 с.

6. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М.: Машиностроение, 1977. 303 с.
7. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
8. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение, 1989. 297 с.
9. Трент Е.М. Резание металлов. М.: Машиностроение, 1980. 263 с.
10. Участки для электроэрозионной обработки рабочих деталей вырубных штампов и прессформ. М.: ОНТИ ЭНИМС, 1983. 47 с.
11. Этин А.О. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийным инструментом. М.: Машгиз, 1953. 173 с.
12. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании. М.: Машиностроение-1, 2004. 230 с.
13. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Минск: Новое знание, 2006. 512 с.
14. Шум Ал.А. О центрах симметрии функции двух переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. Вып. 30. С.19–23.
15. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О центрах симметрии функции трех переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 1 (5). С. 71–78.
16. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Моменты плоской пластины относительно прямой и некоторые вопросы симметрии // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 2 (10). С. 78–84.
17. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О центрах симметрии плоской выпуклой пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 3 (11). С. 65–72.
18. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О понятии n -симметрии пространственного тела // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 3 (15). С. 66–72.
19. Шум Ал.А., Ветошкин А.М. О центрах симметрии выпуклого пространственного тела // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 2 (18). С. 64–72.
20. Шум Ал.А., Ветошкин А.М. Теорема о центре n -симметрии плоской выпуклой пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 3 (19). С. 75–82.
21. Шум Ал.А., Ветошкин А.М. Теорема о центре n -симметрии выпуклого пространственного тела // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 4 (20). С. 76–82.
22. Шум Ал.А., Ветошкин А.М. Заметка об n -симметрии линейного стержня // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 2 (22). С. 63–71.
23. Шум Ал.А., Ветошкин А.М. Теорема о линиях n -симметрии выпуклой плоской пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. №1 (25). С. 74–81.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШУМ Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: shum@tstu.tver.ru

ВЕТОШКИН Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики, информатики и вычислительной техники, Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, 141005, Россия, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1. E-mail: vetkin@mgul.ac.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Шум Ал.А., Ветошкин А.М. Теорема о плоскостях n -симметрии выпуклого тела // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2026. № 1 (29). С. 69–76.

THE n -SYMMETRY PLANES THEOREM OF A CONVEX BODY

Al.A. Shum¹, A.M. Vetoshkin²

¹ *Tver State Technical University (Tver),*

² *Mytishchi filial of MSTU named after N.E. Bauman
(Mytishchi city, Moscow region)*

Abstract. The concept of a moment of the n -th order of a convex body relative to a given plane is considered. A plane is a plane of n -symmetry if the moments of the n -th order of the two sub-bodies into which the initial body is divided by this plane are the same. It is established that the moment of the n -th order of a convex body relative to the plane Π , drawn parallel to a given plane, reaches the smallest value when the plane Π is the plane of $(n - 1)$ -symmetry of this body.

Keywords: moment of n -th order, plane of n -symmetry, plane of half-mass, convex body, density function, mass, center of mass, center of half-mass, electric machine.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SHUM Alexander Anatolievich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: shum@tstu.tver.ru

VETOSHKIN Alexander Mikhailovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics, Informatics and Computer Engineering, MF Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, 1, 1st Institutskaya street, Mytishchi city, Moscow region, 141005, Russia. E-mail: vetkin@mgul.ac.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Shum Al.A., Vetoshkin A.M. The n -symmetry planes theorem of a convex body // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2026. № 1 (29), pp. 69–76.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 532.135

СВЯЗЬ КАПИЛЛЯРНОГО СЦЕПЛЕНИЯ СО СТРУКТУРОЙ И ФОРМОВОЧНЫМИ СВОЙСТВАМИ КЕРАМИЧЕСКИХ ПРЕСС-ПОРОШКОВ. ЧАСТЬ 1. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МАКРОСТРУКТУРЫ ПРЕСС-ПОРОШКОВ

В.В. Белов*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Белов В.В., 2026

Аннотация. Для изучения макро- и микроструктуры керамических пресс-порошков необходимо определить такие параметры, как пористость тела гранулы, ее внутренняя пустотность, и связанные с ними удельные характеристики, что представляет собой достаточно сложную, до сих пор не решенную до конца задачу. При этом особенности микро- и микроструктуры пресс-порошка, а также его влажность, от которой зависит величина капиллярной аутогезии в порошке, определяют технологические и формовочные свойства пресс-порошка: насыпную плотность, сыпучесть, угол естественного откоса, уплотняемость формовочной смеси под давлением в процессе прессования. Поскольку плотность, пористость и другие характеристики микроструктуры гранул пресс-порошка оказывают основное влияние на их свойства, плотность полуфабриката и керамических плиток, то разработке экспериментального метода определения пористости гранул в данной работе уделено особое внимание.

Ключевые слова: керамический пресс-порошок, плотность и пористость, методика определения пористости гранул.

DOI: 10.46573/2658-7459-2026-1-77-85

Применительно к пресс-порошку, полученному сушкой распылением керамического шликера разного химического состава и применяемому в производстве керамических облицовочных плиток, под «микроструктурой» понимают структуру отдельных гранул, характеризующуюся размером и упаковкой первичных частиц, а под «макроструктурой» – структуру порошка в целом, определяемую размером и упаковкой гранул [1]. Влияние микроструктуры пресс-порошка сказывается прежде всего на плотности первоначальной засыпки, а также на средней плотности при сжатии небольшим давлением (порядка нескольких МПа). По мере увеличения прессующего давления влияние микроструктуры порошка на среднюю плотность прессовки уменьшается [2]. В то же время, как указано в той же работе, от плотности исходной упаковки порошка зависит

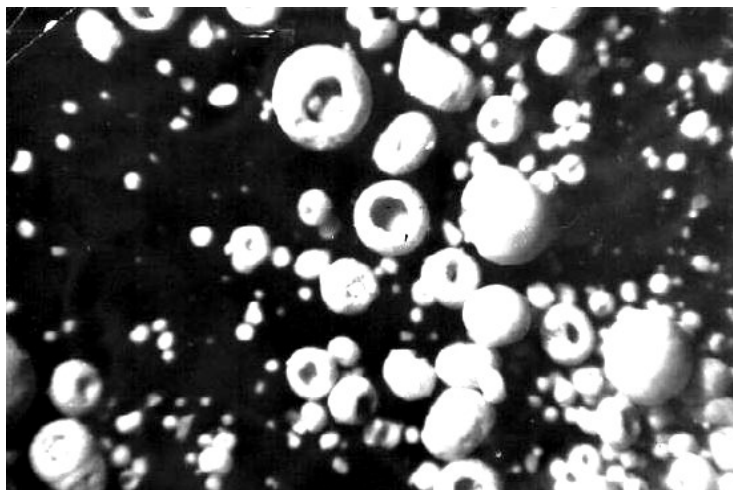
количество заземленного воздуха в порах прессуемого материала, которое при высоких скоростях приложения давления может влиять на величину упругого расширения.

Большое влияние на процесс прессования керамического порошка оказывает его микроструктура, т. е. структура отдельных гранул. Известно, что размеры первичных минеральных частиц, хотя непосредственно и не сказываются на плотности исходной упаковки и начальной стадии уплотнения, однако могут влиять на плотность системы при значительных давлениях прессования. Хорошие результаты при уплотнении показывают порошки из глин с естественным отошителем, а также из молотых непластичных материалов на глиняной связке, которые имеют многофракционный состав с плотной упаковкой первичных частиц [2]. Вместе с тем в этой работе отмечены трудности направленного регулирования размеров первичных минеральных частиц и подбора их оптимальной гранулометрии, связанные, в частности, с выделением и дозировкой компонентов, представленных мельчайшими частицами.

Одним из способов регулирования первичной гранулометрии сырьевой смеси может являться изменение в ее составе количества глинистых составляющих. В работе [3] установлено, что водопоглощение керамических плиток для отделки пола уменьшается с увеличением количества глинистых составляющих и дисперсности сырьевой смеси. Использование этого фактора для регулирования процесса формирования керамических плиток трудноосуществимо, так как количество глинистых компонентов в сырьевой смеси вызывает такие нежелательные явления, как увеличение упругого расширения полуфабриката после снятия давления [2], усадки материала при обжиге, а также влажностного расширения, характеризующего цекоустойчивость и долговечность керамических плиток [4, 5]. С целью улучшения уплотнения керамического порошка и повышения средней плотности полуфабриката авторы работы [6] рекомендуют введение в состав сырьевой смеси талька. Однако нет ясности, как это скажется на свойствах продукции.

Структура гранул и ее влияние на уплотнение пресс-порошка изучались в работе [7]. Выявлена настолько прочная связь между первичными частицами в гранулах, что последние с трудом разрушаются на стадии формирования полуфабриката. О прочности гранул можно судить по графической зависимости плотности полуфабриката от давления. О начале разрушения тела гранул свидетельствует перелом на кривой зависимости относительной плотности прессовки от логарифма давления. Однако при тех значениях давления прессования (15–30 МПа), при которых производится формирование керамических плиток, указанная выше точка перелома вряд ли будет достигнута, так как по данным работы [2] массовое разрушение тела гранул керамических порошков начинается при 250–300 МПа. Тем не менее, как отмечается в последней работе, пористость тела гранул оказывает влияние на процесс уплотнения порошка уже при давлении 15 МПа и выше.

Внешний вид гранул плиточного пресс-порошка, полученного сушкой распылением керамического шликера, при увеличении в 20–30 раз показан на рисунке.



Внешний вид гранул плиточного пресс-порошка

Гранулы пресс-порошка распылительной сушки представляют собой «горшочки» с большой внутренней пустотой, имеющей выход наружу. Для изучения макро- и микроструктуры этих гранул необходимо определить такие параметры, как пористость тела гранулы, ее внутренняя пустотность, и связанные с ними удельные характеристики, что является достаточно сложной, до сих пор не до конца решенной задачей.

Пористость гранул включает в себя пористость тела гранулы и крупные полости, которые придают гранулам горшковидную форму. Наличие крупных полостей в гранулах, согласно гипотезе М. Томана [8], объясняется появлением в капле при сушке отрицательного капиллярного давления, которое влечет за собой продавливание поверхностного слоя и образование полости в грануле.

По косвенным оценкам, плотность тела гранулы составляет $1,72 \text{ г/см}^3$ (плотность абсолютно сухого черепка, отлитого в гипсовую форму), при этом содержание крупных пустот в гранулах в зависимости от их размера и влажности шликера составляет от 2 до 30 %, т. е. плотность гранул колеблется от 1,7 до $1,2 \text{ г/см}^3$, увеличиваясь с уменьшением размера гранул и влажности шликера [9–12]. Однако эти расчетные данные не получили прямого экспериментального подтверждения и должны рассматриваться как ориентировочные. В работе [13] высказывается и рядом экспериментальных данных обосновывается предположение, что образование полостей в гранулах не зависит ни от давления распыления шликера, ни от температуры теплоносителя, а определяется главным образом грансоставом исходного сырья. Для получения частиц горшковидной формы необходимо наличие в исходном сырье более 50 % по массе частиц размером менее 2,5 мкм. Указанное предположение не учитывает влияющие на плотность гранул факторы.

Известный интерес представляет метод изучения структуры гранул с помощью модернизированного санного микротома, использованный в работе [14]. Гранулы в специальной форме заливались твердеющей полупрозрачной смесью, состоящей из коллоксилина, этилового спирта и эфира в соотношении 1 : 2 : 6. После затвердевания смеси гранулы срезались ножом с интервалом 1 мкм. Оптический микроскоп и фотокамера позволяли фиксировать наблюдаемые явления при увеличении в 50–150 раз. Однако

количественных данных, характеризующих структуру гранул, в этой работе не сообщается.

Помимо микроструктуры, определенное влияние на технологические процессы и качество изделий оказывает макроструктура пресс-порошка. В литературе [15, 16] приводятся сведения о том, что зерновой состав порошков должен обеспечивать максимальную плотность первоначальной засыпки. Насколько существенным является это требование, если учесть высокие давления 20–22 МПа, при которых происходит прессование полуфабриката, сопровождающееся разрушением гранул, в указанных работах не сообщается.

Особенности микро- и макроструктуры пресс-порошка, а также его влажность определяют технологические свойства порошка: насыпную плотность, сыпучесть, угол естественного откоса. Установлено, что насыпная плотность с повышением влажности уменьшается, в то время как сыпучесть и угол естественного откоса порошка мало изменяются в интервале влажности 0–10 % и составляют соответственно 40–50 г/с и 20–25° [11, 16]. Причин и закономерностей указанных зависимостей не выявлено.

Поскольку плотность и пористость гранул пресс-порошка оказывает влияние на их свойства, а также плотность полуфабриката и керамических плиток, то разработке экспериментального метода определения пористости гранул должно уделяться достаточное внимание.

В технологии строительных материалов пористость образцов неправильной формы определяют при взвешивании на воздухе и в воде водонасыщенного или парафинированного образца. Эти способы применимы только для образцов, размеры которых позволяют производить индивидуальное взвешивание каждого образца. Керамический пресс-порошок распылительной сушки имеет поперечный размер гранул, равный нескольким десятым миллиметра. Водонасыщение, парафинирование, взвешивание столь малых объемов сопряжено с большими неточностями. Кроме того, объем жидкости, который может удерживаться на поверхности гранулы, особенно в ее впадинах, может быть сравним с объемом жидкости в порах. Для определения пористости таких гранул необходима разработка особого метода, основанного на следующих положениях:

для определения пористости частиц малых размеров (гранул) можно заполнить их поры жидкостью и судить о величине пористости по объему этой жидкости в порах;

если насыщение пор вести путем погружения гранул в жидкость, то отделить жидкость, заполнившую их поры, от жидкости, которая находится в пространстве между гранулами, достаточно трудно. Это можно сделать, если после насыщения пор одной жидкостью ввести в сосуд другую жидкость, с плотностью большей, чем первая. Тогда жидкость с меньшей плотностью, находящаяся между гранулами, всплывет на поверхность жидкости с большей плотностью;

две указанные жидкости не должны растворяться одна в другой;

для лучшего проникновения жидкости с меньшей плотностью в поры гранул их насыщение необходимо вести с вакуумированием.

Осуществление способа, основанного на применении указанных положений, может встретить на практике некоторые затруднения, связанные с наличием в гранулах пор различного вида, например тупиковых и сквозных. Метод будет давать точные результаты, если из тех и других пор жидкость с меньшей плотностью не будет вытесняться.

Жидкость в порах гранулы будет подвергаться действию выталкивающей силы, направленной вверх, которая в случае отсутствия вытеснения должна быть меньше силы, вызывающей движение в капилляре по Пуазейлю, что можно записать так:

$$(\rho_2 - \rho_1) \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} < \frac{32\eta \cdot u_{\phi}}{d^2} + p_0 \quad (1)$$

или

$$(\rho_2 - \rho_1) \cdot \pi \cdot d^2 < 128\eta \cdot u_{\phi} + p_0, \quad (2)$$

где ρ_1 и ρ_2 – плотности первой и второй жидкостей; d – диаметр поры; η – вязкость жидкости; u_{ϕ} – скорость движения жидкости в поре при ее вытеснении; p_0 – начальное капиллярное давление, необходимое для того, чтобы в поре началось движение жидкости.

Уравнение (2) показывает, что, если $u_{\phi} = 0$, вытеснения жидкости не будет при условии

$$(\rho_2 - \rho_1) \cdot \pi \cdot d^2 < p_0. \quad (3)$$

Поскольку в тупиковых порах выталкивающая сила близка к нулю, то проникновение жидкости с большей плотностью в тупиковые поры практически невозможно. Проникновение этой жидкости в сквозные вертикальные и наклонные поры гранулы и вытеснение жидкости с меньшей плотностью в случае пор малого диаметра и значительной величины капиллярного давления p_0 также маловероятно. В то же время из большой полости внутри гранулы жидкость с меньшей плотностью будет вытесняться.

В качестве жидкости для насыщения гранул пресс-порошка был выбран керосин, в котором пресс-порошок не распадается. Точность методики определения пористости тела гранул зависит, во-первых, от того, насколько объем вытесненного керосина соответствует объему пор в теле гранулы и, во-вторых, от точного измерения объема вытесненного керосина.

Сравнение значений истинной плотности порошка, определенных при его насыщении в воде и керосине с помощью вакуумирования, показало, что они одинаковы. Следовательно, керосин действительно проникает во все поры гранул, не разрушая их.

При разработке способа определения пористости гранул пресс-порошка были проделаны предварительные опыты с целью выбора жидкости для вытеснения керосина, в которой бы гранулы пресс-порошка не распадались и с плотностью, большей плотности керосина. Гранулы пресс-порошка не распадаются в этиловом спирте, но чистый спирт оказался непригоден для опытов, так как он растворял керосин. Эксперименты показали, что керосин не растворяется в водно-спиртовом растворе. Для определения оптимальной концентрации водно-спиртового раствора готовилось пять проб объемом 25 см^3 каждая с плотностью 0,812; 0,829; 0,842; 0,852 и 0,861 г/см³. Из каждой пробы отмерялись три одинаковые порции по 7 см^3 в трех пробирках емкостью 10 см^3 . Затем в каждую пробирку микробюреткой отмеривалось 3 см^3 керосина. Водно-спиртовой раствор и керосин в каждой пробирке перемешивались взбалтыванием в течение 1 мин, после чего фиксировали объем всплывшего керосина (плотностью $0,79 \text{ г/см}^3$) через 5, 10 и 20 мин.

Результаты этих измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Растворимость керосина в спирте

№	Плотность водно-спиртового раствора, г/см ³	Первоначальный объем керосина в колбе, см ³	Среднее значение объема всплывшего керосина после перемешивания смеси в течение, мин			Объем растворенного керосина, см ³
			5	10	20	
1	0,812	3	1,1	1,2	1,2	1,8
2	0,829	3	2,5	2,7	2,7	0,3
3	0,842	3	2,5	2,7	2,8	0,2
4	0,852	3	2,9	2,9	3,0	0
5	0,861	3	2,9	3,0	3,0	0

Таким образом, керосин не растворяется в водно-спиртовом растворе плотностью от 0,852 до 0,861 г/см³ (среднее значение 0,856 г/см³). Поэтому если взять водно-спиртовой раствор плотностью 0,856 г/см³ и залить в насыщенный керосином пресс-порошок, то керосин, находящийся в пустотах между гранулами, всплывет на поверхность, а его место займет водно-спиртовой раствор.

Для точного определения объема вытесненного керосина были изготовлены специальные колбы, поскольку стандартные пикнометры не рассчитаны на точное определение вытесненной жидкости. У пикнометра объемом 100 см³ срезали шейку, вместо которой приваривали отрезок микробюретки длиной 12 см с ценой деления 0,1 см³. Методика определения пористости гранул пресс-порошка заключалась в следующем. В специальную колбу на 100 см³ засыпали 8 г сухого пресс-порошка, который заливали 6 г керосина из того расчета, чтобы поверхность пресс-порошка была покрыта слоем керосина примерно на 5 мм. Затем пикнометр помещали на 20 мин в вакуум-эксикатор для удаления воздуха. После вакуумирования в колбу заливали водно-спиртовой раствор плотностью 0,856 г/см³ до отметки, расположенной на 1–2 см ниже верхнего края горловины колбы. Далее колбу наклоняли и медленно вращали в течение одной минуты, чтобы ускорить всплытие керосина. Придавали пикнометру вертикальное положение и через 5 мин определяли объем всплывшего керосина по делениям на шейке пикнометра.

Пористость тела гранул $\Pi_{\text{тг}}$ в процентах определяли по формуле

$$\Pi_{\text{тг}} = \frac{V_{\text{вк}} - V_{\text{нк}}}{V_{\text{вк}} - V_{\text{нк}} + \frac{G}{\rho_{\text{тг}}}} \cdot 100, \quad (4)$$

где $V_{\text{вк}}$ – объем вливаемого в колбу керосина, см³; $V_{\text{нк}}$ – объем всплывшего керосина, см³; G – масса навески пресс-порошка, г; $\rho_{\text{тг}}$ – истинная плотность тела гранул пресс-порошка, измеряемая в воде пикнометрическим методом, г/см³.

Косвенная проверка разработанной методики определения пористости тела гранул пресс-порошка может заключаться в сравнении этой величины у проб пресс-порошка с

разным средним размером гранул. Из теории процесса сушки распылением следует, что гранулы меньшего размера обладают меньшей пористостью тела [8, 16]. Для подтверждения этого были проделаны следующие эксперименты. На нескольких пробах пресс-порошка путем просеивания через сита 1; 0,5; 0,315; 0,25 и 0,1 мм определяли зерновой состав и пористость тела гранул для разных проб и отдельных фракций. По зерновому составу пробы порошка рассчитывали объемно-поверхностный диаметр гранул, характеризующий их средневзвешенный размер [8, 9]:

$$d_{3,2} = \frac{\sum g_i}{\sum \frac{g_i}{d_i}}, \quad (5)$$

где g_i – массовая доля гранул диаметром d_i , %; d_i – средний размер гранул для остатка порошка на данном сите, мм.

Результаты измерений объемно-поверхностного диаметра гранул пресс-порошка и пористости их тела в различных пробах пресс-порошка (табл. 2) показывают, что имеется определенное соответствие между значениями объемно-поверхностного диаметра гранул пресс-порошка и пористости их тела, т. е. с уменьшением размера гранул пористость их тела снижается. Это соответствует теоретическим положениям и литературным данным.

Таблица 2

Объемно-поверхностный диаметр и пористость тела гранул различных проб и фракций пресс-порошка

Номера проб	1	2	3	4
Объемно-поверхностный диаметр порошка, мм	0,281	0,303	0,298	0,299
Пористость тела гранул, %	29,9	32,9	31,4	32,9
Фракции, мм	1–0,5	0,5–0,315	0,315–0,25	0,25–0,1
Пористость тела гранул, %	33,2	33,0	30,6	25,8

Для дополнительной проверки правильности измерений пористости тела гранул по разработанной методике проба пресс-порошка высушивалась до постоянной массы, помещалась в цилиндрическую форму и подвергалась сжатию под давлением 20 МПа с целью ликвидации внутренних пустот гранул. Степень разрушения гранул проверялась под микроскопом. Затем определялась пористость гранул пресс-порошка в разрушенном и неразрушенном состоянии. В том и другом случае было получено значение пористости 31 %. Следовательно, керосин вытесняется водно-спиртовым раствором из внутренней полости гранул и данным способом определяется пористость именно тела гранулы.

Специальными экспериментами было определено, что для измерения пористости тела гранул пресс-порошка с максимальной погрешностью 5 % необходимо произвести четыре повторных опыта, что и делалось далее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баркова Л.С., Белопольский М.С. Влияние некоторых технологических факторов на плотность обожженных прессованных изделий // *Стекло и керамика*. 1976. № 3. С. 17–21.
2. Попильский Р.Я., Пивинский Ю.Е. Прессование порошковых керамических масс. М.: Металлургия, 1983. 272 с.
3. Найдис М.Г. Определение водопоглощения плиток для полов при скоростном обжиге // *Стекло и керамика*. 1979. № 11. С. 22–26.
4. Павлов В.Ф., Веричев Е.Н. К вопросу о влажностном расширении облицовочных плиток // Исследования по технологии производства и расширению ассортимента керамических изделий: Труды НИИСтройкерамики. М.: НИИСтройкерамика, 1981. 157 с.
5. Коркин В.И., Солнышкина Т.Н. О влажностном расширении и цекоустойчивости плиток для внутренней облицовки стен // Исследования в области интенсификации технологических процессов, использования новых видов сырья и расширения ассортимента керамических изделий: Труды НИИСтройкерамики. М.: НИИСтройкерамика, 1982. 125 с.
6. Takahashi M., Suzuki S., Kobayashi T., Araki T.J. // *Coc. Mater., Sci, Jap*. 1982. No. 348, pp. 189–195.
7. Мороз Б.И., Кривоносова Т.И., Лучка М.Х. Исследование структуры керамических пресспорошков и процессов взаимодействия их с водой // Строительные материалы, изделия и санитарная техника: Труды НИИСтройкерамики. Вып. 1. М.: НИИСтройкерамика, 1978. 199 с.
8. Томан М. Об образовании и значении горшковидных частиц, получаемых при сушке распылением // *Коллоидный журнал*. 1963. № 6. С. 727–737.
9. Новая технология керамических плиток / Е.Л. Рохваргер [и др.]; под ред. В.И. Добужинского. М.: Стройиздат, 1977. 232 с.
10. Белопольский М.С. Разработка технологии получения керамического пресс-порошка в распылительных сушилках // Труды НИИСтройкерамики. Вып. 27. М.: НИИСтройкерамика, 1967. 159 с.
11. Белопольский М.С. Гранулометрический состав и влажность порошка, получаемого при механическом распылении шликера // *Стекло и керамика*. 1966. № 2. С. 25–30.
12. Белопольский М.С. Сушка керамических суспензий в распылительных сушилках. М.: Стройиздат, 1972. 125 с.
13. Бильдюкевич В.Л., Мелешко В.Ю., Туровский Л.Н. Формообразование частиц при распылительной сушке керамических шликеров // *Стекло и керамика*. 1977. № 11. С. 30–31.
14. Polyakov A.A. Quality control of press-powders for engineering ceramics // *Glass Ceram*. 1982. No. 39, pp.194–196.
15. Melzer D. Die Bedeutung einiger verfahrenstechnischer Parameter bei Anwendung der isostatischen Prebtechnik // *Silikattechnik*. 1980. № 3, pp. 105–108.
16. Кондрашев Ф.В., Мишулович Л.Я., Павлов В.Ф. Производство керамических плиток для полов. М.: Стройиздат, 1971. 181 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В. Связь капиллярного сцепления со структурой и формовочными свойствами керамических пресс-порошков. Часть 1. Разработка методики оценки параметров макроструктуры пресс-порошков // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2026. № 1 (29). С. 77–85.

**CONNECTION OF CAPILLARY ADHESION WITH STRUCTURE
AND MOLDING PROPERTIES OF CERAMIC PRESS POWDERS.
PART 1. DEVELOPMENT OF EVALUATION METHODOLOGY
PARAMETERS OF MACROSTRUCTURE OF PRESS POWDERS**

V.V. Belov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. To study the macrostructure and microstructure of ceramic press powders, it is necessary to determine such parameters as the porosity of the granule body, its internal voidage and the specific characteristics associated with them, which is a rather complex problem that has not yet been fully solved. Peculiarities of micro- and macrostructure of press powder, as well as its humidity, on which value of capillary autohesion in powder depends, determine technological and moulding properties of press powder: bulk density, flowability, angle of natural slope, compactibility of moulding mixture under pressure in process of pressing. Since the density and porosity and other characteristics of the macrostructure of the granules of the press powder have the main influence on their properties, the density of the semi-finished product and ceramic tiles, special attention is paid to the development of an experimental method for determining the porosity of granules in this work.

Keywords: ceramic press powder, density and porosity, pellet porosity method.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

BELOV Vladimir Vladimirovich – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V. Connection of capillary adhesion with structure and molding properties of ceramic press powders. Part 1. Development of evaluation methodology parameters of macrostructure of press powders // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2026. No. 1 (29), pp. 77–85.

УДК 544.472

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ Pt/Al₂O₃
И Pt/SiO₂ В РЕАКЦИИ ОКИСЛЕНИЯ L-СОРБОЗЫ**

*М.В. Родионов, С.К. Смирнов, Д.Ю. Цветков, А.И. Петрова, Н.В. Лакина, В.Ю. Долуда
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Родионов М.В., Смирнов С.К., Цветков Д.Ю.,
Петрова А.И., Лакина Н.В., Долуда В.Ю., 2026

Аннотация. Проведено систематическое сравнительное исследование каталитической активности платиновых катализаторов, нанесенных на алюмооксидный (Al₂O₃) и кремнеземный (SiO₂) носители, в реакции жидкофазного окисления L-сорбозы молекулярным кислородом. Установлено, что процесс окисления кетозы в присутствии Pt/SiO₂ более эффективен по селективности целевого продукта – 2-кето-L-гулоновой кислоты (в среднем 70 %) по сравнению с Pt/Al₂O₃ (38 %) при температуре 70 °С и времени реакции 3 ч. Конверсия L-сорбозы также выше на 10–15 %. Показана хорошая стабильность Pt/SiO₂ при многократном использовании (до трех циклов), в то время как воспроизводимость Pt/Al₂O₃ после трех циклов снижается почти вдвое. Определена оптимальная температура процесса, при которой достигается наилучшее соотношение между конверсией и селективностью. Сделан вывод о том, что катализатор SiO₂ может быть рекомендован для дальнейших исследований гетерогенно-каталитического способа получения 2-кето-L-гулоновой кислоты.

Ключевые слова: L-сорбоза, окисление, платиновые катализаторы, SiO₂, Al₂O₃, селективность, конверсия, 2-кето-L-гулоновая кислота.

DOI: 10.46573/2658-7459-2026-1-86-93

ВВЕДЕНИЕ

L-сорбоза и 2-кето-L-гулоновая кислота являются промежуточными продуктами при производстве витамина С. Этот многостадийный промышленный процесс, использующий D-глюкозу в качестве исходного материала и включающий различные химические и биотехнологические стадии, был разработан в начале 1930-х годов и с тех пор постоянно совершенствуется [1]. В настоящее время превращение L-сорбозы в 2-кето-L-гулоновую кислоту требует дополнительных трудоемких и длительных этапов защиты и депротекции. Прямое селективное каталитическое окисление L-сорбозы всего за один этап может значительно упростить процесс и снизить производственные затраты. Эта задача в течение многих лет остается предметом интенсивных исследований [2]. Окисление L-сорбозы до 2-кето-L-гулоновой кислоты является ключевой стадией в промышленном синтезе L-аскорбиновой кислоты (витамина С). Эффективность этого процесса напрямую зависит от выбора гетерогенного катализатора, который должен обеспечивать как высокую степень превращения субстрата (конверсию), так и избирательность по целевому продукту (селективность) [3]. Из благородных металлов наиболее часто используется платина благодаря своей способности активировать молекулярный кислород и селективно

окислять вторичные гидроксильные группы сахаридов [4]. Однако каталитические свойства платины в значительной степени зависят от природы носителя, который влияет на дисперсию металлических частиц, их электронное состояние и взаимодействие с реагентами [5]. Гетерогенные платиновые катализаторы показали себя перспективными для окисления L-сорбозы [6] кислородом в водной среде. В литературе сообщалось о селективности по образованию 2-кето-L-гулоновой кислоты около 60 % при 90–95%-й конверсии L-сорбозы, позднее – 63 % при 79%-й конверсии, 67 % при 58%-й конверсии с использованием коммерческого катализатора и около 80 % при 50%-й конверсии на модифицированном катализаторе [7–9]. В то же время отмечалась селективность свыше 95 % на схожих каталитических системах, что вызывает сомнения в сопоставимости результатов. В целом прямое сравнение полученных разными исследователями данных затруднено из-за различий в составе катализаторов, условиях проведения реакции и методах анализа [9–11]. Целью настоящей работы является комплексная сравнительная оценка двух платиновых катализаторов – Pt/Al₂O₃ и Pt/SiO₂ по показателям конверсии и селективности в стандартных, воспроизводимых условиях, приближенных к промышленным. Особое внимание уделено стабильности катализаторов при многократном использовании и достоверности аналитического определения продуктов реакции [12–14].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовали L-сорбозу («Sigma-Aldrich», чистота ≥99 %), карбонат натрия (NaHCO₃, «Химреактив», ч.д.а.) и дистиллированную воду. Катализаторы Pt/Al₂O₃ (3 % масс.) и Pt/SiO₂ (3 % масс.) были предоставлены лабораторией катализа ТвГТУ. Установка для гетерогенного каталитического окисления показана на рисунке. Реакцию проводили в трехгорлой колбе объемом 100 мл, снабженной обратным холодильником, магнитной мешалкой, барботером для подачи кислорода и отверстием для отбора проб. Колба оснащена термостатированной рубашкой, через которую циркулировала термостатирующая жидкость от внешнего термостата, что обеспечивало точное поддержание заданной температуры реакции.

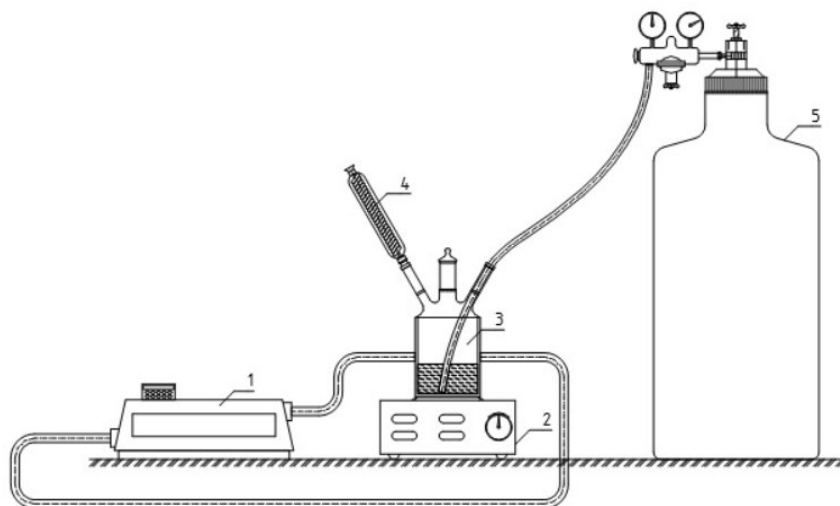


Схема установки для проведения процесса окисления L-сорбозы: 1 – термостат;
2 – магнитная мешалка; 3 – стеклянный реактор; 4 – холодильник;
5 – баллон с кислородом

В колбу загружали 0,50 г L-сорбозы и 18,5 мл воды, после чего вносили 0,15 г катализатора. Затем отдельно растворяли эквимольное количество подщелачивающего агента NaHCO_3 в 6,5 мл из расчета полной нейтрализации образующейся кислоты, при необходимости в ходе реакции pH корректировали внесением раствора NaHCO_3 . Подачу кислорода осуществляли со скоростью 450 мл/мин через штуцер из газового баллона с помощью ротаметра. Реакционная смесь перемешивалась при помощи магнитной мешалки с количеством оборотов 1 000 об/мин. Продолжительность реакции составляла 3 ч, при этом пробы отбирали каждые 30 мин для коррекции pH в случае необходимости, а через 30, 60, 120 и 180 мин совершали забор пробы для последующего анализа методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). По завершении реакции катализатор отделяли центрифугированием при 5 000 об/мин в течение 15 мин. Полученный надосадочный раствор фильтровали и анализировали методом ВЭЖХ. Конверсию (X, %) и селективность (S, %) рассчитывали по формулам:

$$X = \frac{C_0 - C}{C_0} \cdot 100, \quad (1)$$

$$S = \frac{C_{\text{прод}}}{C_0 - C} \cdot 100, \quad (2)$$

где C_0 – начальная концентрация L-сорбозы; C – ее остаточная концентрация; $C_{\text{прод}}$ – концентрация 2-кето-L-гулоновой кислоты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для объективной оценки каталитической эффективности платиновых систем, нанесенных на различные носители, все эксперименты проводились в строго контролируемых идентичных условиях, максимально приближенных к потенциально промышленным. Температура реакции была зафиксирована на уровне 70 °С, что, согласно предварительным исследованиям, представляет собой оптимальное значение между кинетикой основной реакции окисления и термодинамической стабильностью как исходного субстрата (L-сорбозы), так и целевого продукта (2-кето-L-гулоновой кислоты). Время проведения процесса составило 3 ч, что является достаточным для достижения устойчивых значений конверсии без риска глубокого окисления или термического разложения. Значение pH в ходе реакции поддерживалось в диапазоне 7–8 путем внесения рассчитанного количества раствора карбоната натрия, что обеспечивало нейтрализацию образующейся кислоты и предотвращало дезактивацию катализатора в кислой среде. Подача кислорода осуществлялась с постоянной скоростью 20 мл/мин, а интенсивное перемешивание гарантировало равномерное распределение газовой фазы в жидкой среде. Такие условия позволяют провести корректное сравнение двух исследуемых систем – $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (3 % масс.) и Pt/SiO_2 (3 % масс.) – по ключевым параметрам: степени превращения субстрата (конверсии) и избирательности по целевому продукту (селективности). Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные характеристики катализаторов при 70 °С и 3-часовой реакции

№ опыта	Катализатор	Конверсия, %	Селективность, %
8	Pt/Al ₂ O ₃	64,3	76,8
15	Pt/Al ₂ O ₃	43,8	32,7
19	Pt/Al ₂ O ₃	45,5	43,5
11	Pt/SiO ₂	60,9	72,7
16	Pt/SiO ₂	62,9	74,1
18	Pt/SiO ₂	60,8	71,9
20	Pt/SiO ₂	54,2	66,2

Как видно из данных таблицы, процесс окисления L-сорбозы в присутствии Pt/SiO₂ проявляет селективность на 25–40 % выше, чем окисление с участием Pt/Al₂O₃ (3 % Pt). Итоговая конверсия процесса каталитического окисления кетозы в присутствии Pt/SiO₂ стабильно выше на 10–15 %. Это свидетельствует о том, что поверхность каталитической системы Pt/SiO₂ содержит преимущественно активные центры, способствующие избирательному окислению первичной гидроксильной группы без разрыва углеродного скелета. Такие показатели можно объяснить различным количеством кислотных центров на поверхности носителя Al₂O₃, которые могут катализировать побочные реакции дегидратации и распада молекулы L-сорбозы, что снижает селективность. Для выявления оптимального температурного режима в табл. 2 приведены результаты серии экспериментов при 60, 70 и 80 °С. Выбор этих значений обусловлен необходимостью найти оптимальное соотношение между селективностью, конверсией и подавлением побочных процессов термического распада.

Таблица 2

Влияние температуры на каталитическое окисление L-сорбозы

Катализатор	Температура, °С	Конверсия, %	Селективность, %
Pt/Al ₂ O ₃	60	33,8	53,0
Pt/Al ₂ O ₃	70	45,0	38,0
Pt/Al ₂ O ₃	80	49,5	100,0
Pt/SiO ₂	60	47,2	49,3
Pt/SiO ₂	70	60,0	71,0
Pt/SiO ₂	80	66,7	53,2

Полученные данные показывают, что в процессе гетерогенного окисления при 60 °С с использованием Pt/SiO₂ каталитическая реакция недостаточно эффективна для превращения субстрата в целевой продукт: конверсия не превышает 48 %, а селективность находится на уровне 49 %. При проведении процесса каталитического окисления при 80 °С наиболее высокая эффективность отмечается в присутствии Pt/Al₂O₃. Несмотря на

формально высокую селективность (100 %), визуально зафиксировано образование темной массы, что свидетельствует о термическом распаде субстрата и делает данные по селективности недостоверными. В случае гетерогенного окисления в присутствии Pt/SiO₂ повышение температуры до 80 °С приводит к росту конверсии до 67 %, однако селективность падает до 53 %, что указывает на развитие побочных реакций – вероятно, дегидратации и фрагментации углеродного скелета. Оптимальные результаты для окислительного процесса достигаются при 70 °С. Особенно можно выделить гетерогенную систему Pt/SiO₂, которая при 70 °С обеспечивает конверсию 60 % и селективность 71 %.

При исследовании стабильности в окислительном процессе гетерогенных катализаторов Pt/SiO₂ и Pt/Al₂O₃ особое внимание уделено стабильности при повторном применении, что имеет ключевое значение для практического использования. Полученные данные показывают принципиальное различие в поведении каталитических систем: активный металл на алюмооксидном носителе после трех циклов изменяется с начальных значений около 77 % примерно до уровня 38 %. Это указывает на значительную деградацию каталитической системы. Напротив, активный металл на кремнеземном носителе сохраняет высокую стабильность даже после трехкратного использования: селективность процесса снижается незначительно – с 72–74 до 66 %. Это различие можно объяснить с учетом природы носителя. Как отмечено в литературе, кислотные поверхности, такие как Pt/Al₂O₃, способствуют побочным реакциям дегидратации сахаридов, которые особенно усиливаются при многократном использовании из-за накопления продуктов разложения и изменения состояния поверхности. Кроме того, возможно частичное вымывание платины из алюмооксидного носителя в ходе реакции, что приводит к потере активных центров и снижению селективности. Наиболее эффективным в процессе окисления является SiO₂-носитель, обладающий нейтральной или слабокислотной поверхностью. В процессе окисления он не катализирует побочные реакции. Более того, гетерогенный катализатор Pt/SiO₂ в ходе окисления обеспечивает высокую устойчивость платиновых частиц к агрегации и вымыванию, что подтверждается стабильностью каталитических характеристик при его повторном использовании. Таким образом, катализатор, участвующий в процессе гетерогенного окисления, а именно Pt/SiO₂, представляет собой более надежную и долговечную каталитическую систему для проведения процесса гетерогенного окисления L-сорбозы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования установлено, что в процессе гетерогенного окисления каталитическая активность катализатора Pt/SiO₂ превосходит эффективность катализатора Pt/Al₂O₃ (3 % Pt) по всем ключевым параметрам: конверсии, селективности и особенно стабильности при многократном использовании. Оптимальные условия проведения реакции (температура 70 °С, время 3 ч, поддержание pH в диапазоне 7–8) обеспечивают для процесса окисления каталитической системы Pt/SiO₂ конверсию L-сорбозы около 61 % и селективность по 2-кето-L-гулоновой кислоте на уровне 71 %. При этом даже после трех циклов использования селективность снижается лишь до 66 %, что свидетельствует о высокой устойчивости гетерогенных катализаторов в реакции окисления L-сорбозы на основе платины. Наиболее значимым результатом работы является установление преимущества использования кремнеземного носителя перед алюмооксидным для платиновых катализаторов в реакции гетерогенного окисления L-сорбозы. Эта система сочетает высокую избирательность по целевому продукту и

долговечность, что делает ее перспективной для дальнейшей оптимизации и потенциального промышленного применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim S., Lee K.Y., Park D.W. Selective oxidation of L-sorbose over Au–Pt/TiO₂ catalysts // *Catalysis Today*. 2018. Vol. 300, pp. 112–119.
2. Deng L., Li J., Fu Y. Advances in catalytic conversion of biomass-derived sugars to value-added chemicals // *Chemical Reviews*. 2021. Vol. 121. No. 20, pp. 12539–12601.
3. Design of Pt–Au bimetallic catalysts for selective oxidation of L-sorbose to 2-keto-L-gulonic acid / R. Guo [et al.] // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2021. Vol. 60. No. 28, pp. 10235–10244.
4. Ishikawa T., Yamaguchi T., Mitsudome T. Efficient aerobic oxidation of carbohydrates using supported platinum catalysts under mild conditions // *Chemistry – An Asian Journal*. 2019. Vol. 14. No. 12, pp. 2063–2069.
5. Comparative study of Pt/C, Pt/Al₂O₃, and Pt/SiO₂ catalysts for glucose oxidation: The critical role of support hydrophilicity / Y. Zhang [et al.] // *Catalysis Letters*. 2022. Vol. 152. No. 4, pp. 1125–1134.
6. Mallat T., Brönnimann C., Baiker A. Modification of supported Pt catalysts by preadsorbed phosphines: enhanced selectivity in L-sorbose oxidation // *Journal of Catalysis*. 1996. Vol. 161. No. 2, pp. 720–729.
7. Tuning the selectivity of glucose oxidation by modulating the surface electronic structure of Pt nanoparticles / X. Liu [et al.] // *ACS Catalysis*. 2021. Vol. 11. No. 12, pp. 7125–7135.
8. Selective oxidation of glucose over Pt catalysts supported on different oxides: Correlation between activity and support properties / Z. Zhao [et al.] // *Catalysis Communications*. 2018. Vol. 112, pp. 1–5.
9. Grünwald E., Prübe U., Vorlop K.-D. Analytical problems in the direct oxidation of L-sorbose // *Applied Catalysis A: General*. 2011. Vol. 401, № 1-2. P. 112–119.
10. Aerobic oxidation of sugars over supported Pt catalysts: Influence of support basicity and reaction medium / K. Wu [et al.] // *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. 2019. Vol. 128. No. 1, pp. 345–360.
11. Silica-supported Pt catalysts with controlled particle size for selective sugar oxidation / Y. Tang [et al.] // *Catalysts*. 2020. Vol. 10. No. 11. Art. 1289.
12. Effect of metal-support interaction on the catalytic performance of Pt/Al₂O₃ in sugar alcohol oxidation / R. Gao [et al.] // *Catalysis Science & Technology*. 2021. Vol. 11. No. 18, pp. 6321–6330.
13. Pt nanoparticles on mesoporous SiO₂ for efficient and selective oxidation of biomass-derived alcohols / L. Chen [et al.] // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2020. Vol. 306. Art. 110432.
14. Stabilization of Pt nanoparticles on functionalized SiO₂ for selective oxidation of polyols / D. Wang [et al.] // *Applied Surface Science*. 2023. Vol. 612. Art. 155789.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РОДИОНОВ Михаил Васильевич – студент, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: mischa.rodionov.05@mail.ru

СМИРНОВ Сергей Константинович – студент, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: smirn2204@gmail.com

ЦВЕТКОВ Дмитрий Юрьевич – студент, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: dm.cwetkow@mail.ru

ПЕТРОВА Арина Игоревна – студентка, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: arinapetrova989@gmail.com

ЛАКИНА Наталия Валерьевна – кандидат химических наук, доцент кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: lakina@yandex.ru

ДОЛУДА Валентин Юрьевич – доктор химических наук, заведующий кафедрой химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: doludav@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Родионов М.В., Смирнов С.К., Цветков Д.Ю., Петрова А.И., Лакина Н.В., Долуда В.Ю. Сравнительная оценка каталитической активности Pt/Al₂O₃ и Pt/SiO₂ в реакции окисления L-сорбозы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2026. № 1 (29). С. 86–93.

COMPARATIVE EVALUATION OF THE CATALYTIC ACTIVITY OF Pt/Al₂O₃ AND Pt/SiO₂ IN THE OXIDATION REACTION OF L-SORBOSE

M.V. Rodionov, S.K. Smirnov, D.Yu. Tsvetkov, A.I. Petrova, N.V. Lakina, V.Yu. Doluda
Tver State Technical University (Tver, Russia)

Abstract. A systematic comparative study of the catalytic activity of platinum catalysts supported on alumina (Al₂O₃) and silica (SiO₂) carriers in the liquid-phase oxidation of L-sorbose with molecular oxygen has been conducted. It was found that the Pt/SiO₂ catalyst provides significantly higher selectivity towards the target product, 2-keto-L-gulonic acid (on average 70 %), compared to Pt/Al₂O₃ (38 %) at a temperature of 70 °C and a reaction time of 3 hours. The conversion of L-sorbose on Pt/SiO₂ is also 10–15 % higher. Pt/SiO₂ demonstrated good stability upon multiple reuse (up to three cycles), while the activity of Pt/Al₂O₃ decreases by almost half after three cycles. The optimal process temperature was determined to be 70 °C, at which the best balance between conversion and selectivity is achieved. Thus, Pt/SiO₂ is recommended as the preferred catalyst for further research and potential scale-up.

Keywords: L-sorbose, oxidation, platinum catalysts, SiO₂, Al₂O₃, selectivity, conversion, 2-keto-L-gulonic acid.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

RODIONOV Mikhail Vasilyevich – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mischa.rodionov.05@mail.ru

SMIRNOV Sergey Konstantinovich – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: smirn2204@gmail.com

TSVETKOV Dmitry Yuryevich – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: dm.cwetkow@mail.ru

PETROVA Arina Igorevna – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: arinapetrova989@gmail.com

LAKINA Natalia Valeryevna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: lakina@yandex.ru

DOLUDA Valentin Yuryevich – Doctor of Chemistry, Head of the Department of Polymer Chemistry and Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: doludav@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Rodionov M.V., Smirnov S.K., Tsvetkov D.Yu., Petrova A.I., Lakina N.V., Doluda V.Yu. Evaluation of the Catalytic Activity of Pt/Al₂O₃ and Pt/SiO₂ in the Oxidation Reaction of L-Sorbose // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2026. No. 1 (29), pp. 86–93.

УДК 549.313.2:542.943-92:532.73-3

**КИНЕТИКА ГИДРОХИМИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ АНТИМОНИТА
В РАСТВОРАХ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ**

А.Е. Соболев^{1,2}, Н.Ю. Старовойтова¹, В.Ю. Долуда¹

¹Тверской государственный технический университет (г. Тверь),

²Тверской государственный медицинский университет Минздрава России

© Соболев А.Е., Старовойтова Н.Ю.,
Долуда В.Ю., 2026

Аннотация. Установлены зависимости скорости окисления антимонита от концентрации азотной кислоты, температуры, частоты вращения диска и продолжительности взаимодействия. Получены адекватные кинетические модели, позволяющие рассчитать удельную скорость окисления при любой комбинации значений указанных факторов. Выявлено, что процесс окисления протекает в смешанном режиме, близком к кинетическому. По мере накопления на поверхности диска осадков молекулярной серы и Sb₂O₅ процесс переходит в режим внутренней диффузии. Наблюдаемый высокий порядок скорости окисления по концентрации азотной кислоты объяснен автокаталитическим действием продуктов ее восстановления. Полученные кинетические характеристики

расширяют базу данных по кинетике гидрохимического окисления сульфидов и могут быть использованы для разработки рекомендаций по эффективному комплексному освоению сурьмяных руд и концентратов.

Ключевые слова: антимонит (сульфид сурьмы(III)), азотная кислота, гидрохимическое окисление, кинетика.

DOI: 10.46573/2658-7459-2026-1-93-102

ВВЕДЕНИЕ

Антимонит (сульфид сурьмы(III)) Sb_2S_3 – один из основных промышленных минералов в Sb-содержащих рудах [1], которые при этом зачастую содержат золото, серебро, сульфиды цветных металлов и другие ценные соединения. По экологическим и экономическим соображениям гидрометаллургические технологии переработки этих руд являются более предпочтительными, чем пирометаллургические [2]. Поиск эффективных путей комплексного освоения сурьмяных руд требует тщательного изучения кинетики гидрохимического окисления антимонита как важного компонента этих руд. Известно, что азотная кислота является активным окислителем сульфидов металлов и селективным растворителем сульфидных руд и концентратов [3].

Наиболее достоверные кинетические характеристики взаимодействия минералов с растворами можно получить, используя метод вращающегося диска [4, 5], который обеспечивает равнодоступность поверхности растворяющегося кристалла в условиях регулируемой конвекции. Этот метод лишен многих недостатков, присущих другим методам исследования кинетики растворения (особенно дисперсных материалов). Сочетание метода вращающегося диска с факторным планированием эксперимента позволяет получать кинетические модели процессов растворения при любых режимах их протекания [6–8].

Цель работы заключалась в изучении кинетики гидрохимического окисления антимонита в растворах азотной кислоты. Для достижения указанной цели было необходимо получить адекватные кинетические модели, позволяющие рассчитывать удельную скорость растворения антимонита при различных сочетаниях значений факторов (концентрации реагента, температуры, частоты вращения диска и продолжительности измерений). Физико-химическая интерпретация полученных моделей позволила установить закономерности протекания процесса, определить его макромеханизм и выявить лимитирующие стадии растворения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальная часть исследования включала в себя подготовку дисков антимонита, эксперименты по гидрохимическому окислению, получение кинетических моделей и их физико-химическую интерпретацию.

Реагенты

В качестве объекта исследования был выбран образец природного антимонита. По результатам химического анализа он содержал 71,1 % сурьмы и 28,2 % серы (по массе), что соответствует формуле Sb_2S_3 . Содержание молекулярной серы было менее 0,07 %, As_2S_3 – менее 0,3 %, нерастворимого в царской водке осадка – менее 0,2 %. Влажность образца составляла менее 0,03 %.

Диски диаметром 3,5 см и толщиной примерно 0,45 см были вырезаны из цельной горной породы. Поверхности дисков полировали, затем замачивали в 0,5 М растворе HNO_3 в течение 10–15 мин, после чего тщательно промывали деионизированной водой. Замачивание в азотной кислоте было необходимо для устранения проблем воспроизводимости, связанных с подготовкой поверхностей дисков.

Растворы азотной кислоты готовились из деионизированной воды и реактивов квалификации «х.ч.».

Процедура измерения скорости растворения

Эксперименты по растворению проводились с использованием вращающегося диска, что обеспечивало однородность доступной поверхности и четкую гидродинамику. Если растворение лимитируется скоростью массопереноса, скорость растворения равна потоку растворенного вещества из объема жидкости к поверхности диска и, следовательно, пропорциональна квадратному корню скорости вращения. Если же растворение лимитируется кинетикой поверхностной реакции, скорость растворения не зависит от скорости вращения. Дополнительные сведения о теории массопереноса вблизи вращающегося диска приведены в литературе [4–6]. Методика выполнения эксперимента подробно описана в [5, 6].

В каждом опыте объем раствора азотной кислоты составлял 200 мл. Для того чтобы расход азотной кислоты на растворение сульфида сурьмы не влиял на исходную концентрацию HNO_3 , всегда использовали значительный избыток кислоты от стехиометрически необходимого количества.

Эксперименты проводились в термостатированном реакторе с точностью установки температуры 0,1 °С. Диск, вращающийся с заданной частотой, помещался в реактор с раствором азотной кислоты с заданными температурой и концентрацией раствора. В ходе экспериментов из реактора периодически отбиралось около 10 проб раствора, которые анализировались на содержание сурьмы методами переменного-токового полярографии и экстракционной фотометрии. При образовании на поверхности диска твердой фазы ее одновременно эвакуировали и анализировали в обычном режиме. Содержание сурьмы в растворе и твердой фазе суммировалось. Скорость гидрохимического окисления (W , моль·дм⁻²·с⁻¹) рассчитывали по общему количеству сурьмы, перешедшей с единицы площади поверхности диска (Q , моль·дм⁻²) за единицу времени. Каждый эксперимент повторяли не менее 3 раз.

Процедура получения кинетических моделей

Для изучения кинетики гидрохимического окисления антимонита использовался метод полного факторного эксперимента. В общем случае между W и наиболее важными влияющими факторами – молярной концентрацией раствора азотной кислоты C (моль·дм⁻³), температурой T (К), частотой вращения диска ω (с⁻¹) и длительностью измерений τ (с) – существует следующая зависимость:

$$W = k_0 \cdot C^n \cdot \exp(-E_a / RT) \cdot \omega^m \cdot \tau^p. \quad (1)$$

Логарифмирование выражения (1) приводит к линейному уравнению

$$\ln W = \ln k_0 + n \cdot \ln C + q/T + m \cdot \ln \omega + p \cdot \ln \tau, \quad (2)$$

где $q = -E_a/R$. Для упрощения вида полиномиальных моделей в качестве влияющих факторов обычно выбирались $\ln C$, $1/T$, $\ln \omega$, $\ln \tau$, а в качестве функции отклика – $\ln W$. Замена переменных: $y = \ln W$; $X_1 = \ln C$; $X_2 = 1/T$; $X_3 = \ln \omega$; $X_4 = \ln \tau$ и последующий их переход к безразмерным значениям факторов x_i по формуле

$$x_i = (X_i - \bar{X}_i) / \Delta X_i$$

позволили в результате полного факторного эксперимента 2^4 получить полиномиальные модели в виде

$$y = b_0 + \sum_i b_i x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j. \quad (3)$$

(Коэффициенты при взаимодействиях третьего и четвертого порядков во всех случаях оказались незначимыми).

Полученные таким образом полиномиальные модели проверяли на адекватность, а затем преобразовывали в уравнения скорости, физико-химическую интерпретацию которых проводили так, как описано нами ранее [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изучены зависимости количества сурьмы, перешедшей с единицы площади поверхности диска (Q , моль·дм⁻²), от продолжительности окисления (τ , с) при различных концентрациях азотной кислоты (рис. 1). Видно, что на начальном участке этих кривых (при $\tau < 1\,000$ с) наблюдаются прямые зависимости между Q и τ . Это означает независимость начальной скорости процесса от продолжительности окисления. По мере накопления на поверхности диска осадков молекулярной серы и Sb_2O_5 (при $\tau > 2\,000$ с) наблюдаются отклонения от линейности. В этих случаях отмечается влияние продолжительности процесса на скорость окисления.

Прежде всего определяли начальную скорость окисления. При $\tau < 1\,000$ с и $\omega = 4,0$ с⁻¹ исследовали влияние концентрации растворов азотной кислоты на скорость окисления при различных температурах (рис. 2). Видно, что увеличение C приводит к увеличению W . Наиболее значительный рост скорости растворения наблюдался при $C = 4 \dots 10$ моль·дм⁻³. Подобная тенденция была обнаружена ранее при гидрохимическом окислении пирита азотной кислотой [9]. При $C > 10$ моль·дм⁻³ скорость окисления слабо зависит от концентрации HNO_3 .

Затем при $\tau < 1\,000$ с и $\omega = 4,0$ с⁻¹ были исследованы зависимости натурального логарифма скорости окисления от обратной температуры при различных концентрациях растворов азотной кислоты (рис. 3). Очевидно, что скорость растворения увеличивается с ростом температуры, причем на эту зависимость влияет концентрация окислителя.

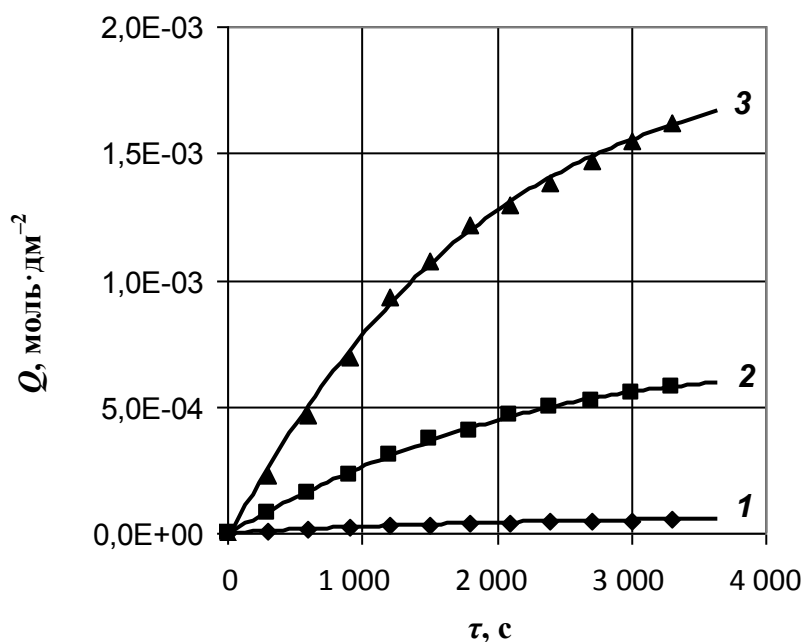


Рис. 1. Зависимости количества сурьмы, перешедшей с единицы площади поверхности диска (Q , $\text{моль} \cdot \text{дм}^{-2}$), от продолжительности окисления (τ , с) при различных концентрациях азотной кислоты C ($T = 323 \text{ К}$, $\omega = 4,0 \text{ с}^{-1}$):
1 – 2 М, 2 – 6 М, 3 – 10 М

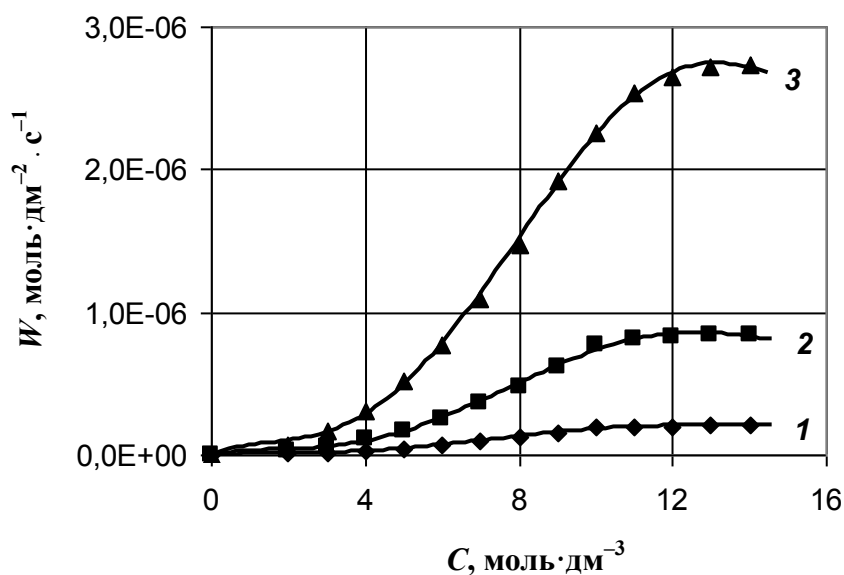


Рис. 2. Влияние концентрации растворов азотной кислоты C на скорость окисления антимонита W при различных температурах T ($\tau < 1000 \text{ с}$, $\omega = 4,0 \text{ с}^{-1}$):
1 – 293 К, 2 – 323 К, 3 – 353 К

При $C = 2 \dots 10$ моль·дм⁻³, $T = 293 \dots 353$ К, $\omega = 1,6 \dots 10,0$ с⁻¹ и $\tau = 60 \dots 900$ с получена следующая адекватная кинетическая модель:

$$W = 2,63 \cdot 10^{-4} \cdot C^{3,20-(340/T)} \cdot \exp(-3560/T) \cdot \omega^{0,18} \cdot \tau^0. \quad (4)$$

Анализ уравнения (4) показывает, что скорость окисления не зависит от продолжительности экспериментов ($W \sim \tau^0$). Этому соответствует область линейности на рис. 1.

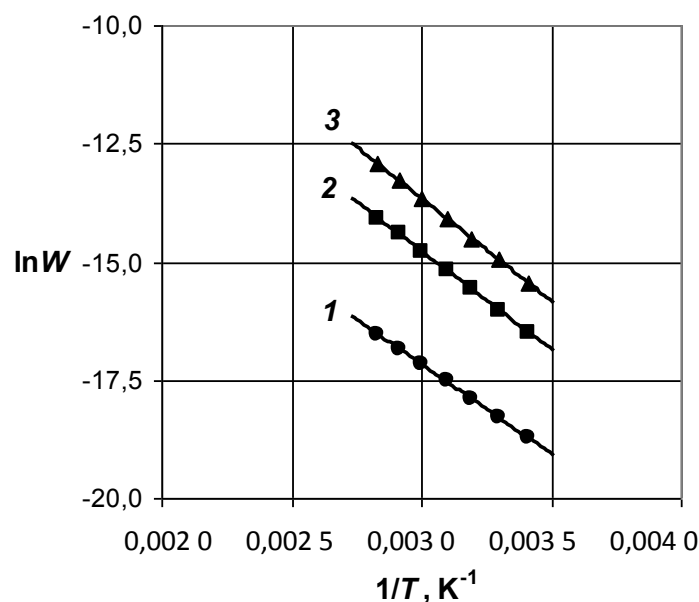
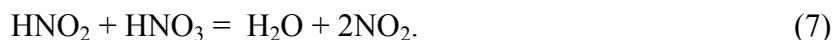
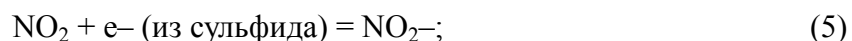


Рис. 3. Влияние обратной температуры на натуральный логарифм скорости окисления антимонита W при различных концентрациях растворов азотной кислоты C ($\tau < 1000$ с, $\omega = 4,0$ с⁻¹): 1 – 2 М, 2 – 6 М, 3 – 10 М

Порядок скорости окисления по концентрации азотной кислоты, по-видимому, зависит от температуры: при $T = 293$ К он равен 2,04, тогда как повышение T до 353 К приводит к его некоторому повышению до 2,24. Наблюдаемый высокий (выше второго) порядок скорости окисления по концентрации азотной кислоты можно объяснить автокаталитическим действием продуктов восстановления кислоты (NO_2 и HNO_2) на кинетику процесса. Аналогичная ситуация при гидрохимическом окислении других сульфидов азотной кислотой была описана в литературе ранее [9].

Механизм автокаталитического действия NO_2 и HNO_2 предложен Эвансом [10]:



Регенерированный в реакции (7) NO_2 возвращается в качестве реагента в полуреакцию (5).

Влияние температуры на скорость окисления антимонита носит сложный характер. Согласно модели (4), кажущаяся энергия активации зависит от концентрации азотной кислоты: при $C = 2$ моль·дм⁻³ она равна 31,5 кДж·моль⁻¹, тогда как увеличение C до 10 моль·дм⁻³ приводит к значению 36,1 кДж·моль⁻¹. Изменение энергии активации с ростом концентрации окислителя свидетельствует о сложном многостадийном механизме взаимодействия антимонита с азотной кислотой.

Из уравнения (4) следует, что скорость окисления слабо зависит от частоты вращения диска (порядок W по ω равен 0,18). Обычно при автокаталитическом действии продуктов восстановления азотной кислоты этот порядок имеет отрицательные значения [9], что было объяснено удалением каталитически активных продуктов восстановления HNO_3 с поверхности диска с ростом ω . Наблюдаемое в данной работе значение 0,18, по нашему мнению, является кажущимся и суммарным. Это результат сочетания кинетически контролируемого характера процесса (с автокаталитическим действием продуктов на скорость процесса) и диффузионно-контролируемого ($W \sim C^{0,5}$), когда скорости диффузии и химической реакции становятся соизмеримыми.

Комплексный анализ зависимости скорости процесса окисления от основных факторов позволяет сделать вывод о том, что в изученных условиях ($\tau < 1000$ с) взаимодействие антимонита с растворами азотной кислоты протекает в смешанном, близком к кинетическому режиме с возникновением диффузионных ограничений при уменьшении концентрации реагента и повышении температуры.

При окислении антимонита в более концентрированных растворах азотной кислоты ($C > 10$ моль·дм⁻³) достигается состояние адсорбционного насыщения. Полученная при $T = 293 \dots 353$ К, $\omega = 1,6 \dots 10,0$ с⁻¹ и $\tau = 60 \dots 900$ с кинетическая модель

$$W = 0,768 \cdot C^0 \cdot \exp(-4440/T) \cdot \omega^0 \cdot \tau^0 \quad (8)$$

соответствует $E_a = 36,9$ кДж·моль⁻¹. Взаимодействие контролируется кинетически ($W \sim \omega^0$). Лимитирующей стадией является химическая реакция антимонита с азотной кислотой. Нулевой порядок W по концентрации HNO_3 обусловлен насыщением реакционной поверхности сульфида сурьмы(III) каталитически активными продуктами восстановления азотной кислоты. Отсутствие зависимости скорости растворения от частоты вращения диска (псевдонулевой порядок W по ω) можно объяснить избытком этих каталитически активных частиц в концентрированных растворах HNO_3 . В результате их удаление из зоны реакции не приводит к уменьшению W с ростом ω .

При $\tau > 2000$ с наблюдается образование твердой фазы на поверхности вращающегося диска, приводящее к ограничению внутренней диффузии и резкому снижению скорости окисления (обнаружено, что количество окисленного антимонита Q увеличивается пропорционально $\tau^{0,5}$, и это соответствует области нелинейности на рис. 1).

При $C = 2 \dots 10$ моль·дм⁻³; $T = 293 \dots 353$ К; $\omega = 1,6 \dots 10,0$ с⁻¹, $\tau = 200 \dots 300$ с получена следующая кинетическая модель:

$$W = 4,86 \cdot 10^{-5} \cdot C^{2,11} \cdot \exp(-1740/T) \cdot \omega^0 \cdot \tau^{-0,5}. \quad (9)$$

Очевидно, что уменьшение скорости растворения со временем ($W \sim \tau^{-0,5}$) обусловлено тем, что $Q \sim \tau^{0,5}$, поскольку $W = \partial Q / \partial \tau$. Относительно низкая кажущаяся энергия активации ($E_a = 14,5$ кДж·моль⁻¹) и независимость скорости окисления от частоты вращающегося диска ($W \sim \omega^0$) свидетельствуют о том, что при длительном взаимодействии скорость окисления антимонита контролируется внутренней диффузией в порах новой фазы, образующейся на поверхности минерала. Результаты химического анализа показали, что эта фаза содержит молекулярную серу и Sb₂O₅. Относительно высокий порядок W по C ($W \sim C^{2,11}$) вместо $W \sim C$, что характерно для внутридиффузионного процесса, является следствием того, что скорость автокаталитической химической реакции сопоставима со скоростью внутридиффузионного процесса. Поэтому процесс протекает в смешанном режиме, близком к внутридиффузионному.

ВЫВОДЫ

С использованием метода вращающегося диска и факторного планирования эксперимента изучена кинетика гидрохимического окисления антимонита в растворах азотной кислоты. Определено влияние концентрации азотной кислоты в растворе, температуры, частоты вращения диска и продолжительности взаимодействия. Получены адекватные кинетические модели, позволяющие рассчитать скорость окисления антимонита при любой комбинации значений вышеуказанных факторов.

На начальном этапе окисления процесс протекает в смешанном режиме, близком к кинетическому. Обнаружено автокаталитическое действие продуктов реакции на скорость окисления. Установлено, что порядок скорости растворения по концентрации азотной кислоты превышает 2. Кажущаяся энергия активации варьируется в пределах от 31,5 кДж·моль⁻¹ (в 2 М растворах азотной кислоты) до 36,1 кДж·моль⁻¹ (в 10 М растворах HNO₃).

При $C > 10$ моль·дм⁻³ процесс протекает в кинетическом режиме. Наблюдается насыщение реакционной поверхности сульфида сурьмы(III) каталитически активными продуктами восстановления азотной кислоты. Кажущаяся энергия активации составляет 36,9 кДж·моль⁻¹.

При длительном взаимодействии скорость окисления антимонита контролируется внутренней диффузией в порах новой фазы, образующейся на поверхности минерала и состоящей из молекулярной серы и Sb₂O₅.

Полученные кинетические характеристики следует учитывать при определении оптимальных условий реализации существующих технологий переработки содержащих сурьму руд и концентратов, а также в качестве информации для разработки новых. Они расширяют базу данных по кинетике гидрохимического окисления сульфидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов А.А. Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. М.: МГТУ, 2005. Т. 3 (ч. 2). С. 383–418.
2. Сурьма / под ред. С.М. Мельникова. М.: Metallurgia, 1977. 536 с.
3. Lutsik V.I., Sobolev A.E. The investigation of the kinetics of hydrochemical oxidation of metal sulphides with the aim of determination of the optimal conditions for the selective extraction of molybdenum from ores // *J. Min. & Metall.* 2005. Vol. 41B, pp. 33–45.
4. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 699 с.
5. Каковский И.А., Поташников Ю.М. Кинетика процессов растворения. М.: Metallurgia, 1975. 224 с.
6. Луцик В.И., Соболев А.Е. Кинетика гидролитического и окислительного растворения сульфидов металлов. М.: ТГТУ, 2009. 139 с.
7. Lutsik V.I., Sobolev A.E. The kinetic models of dissolution processes of oxide and sulphide minerals. *10th Conference on Environmental and Mineral Processing*; Ed. P. Fečko. Part 2. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2006, pp. 137–143.
8. Lutsik V.I., Sobolev A.E. The kinetics of hydrolytic and oxidative dissolution of oxide and sulphide minerals. *XII Balkan Mineral Processing Congress*; Ed. G.N. Anastassakis. Delphi: National Technical University of Athens, 2007, pp. 493–499.
9. Соболев А.Е., Луцик В.И., Поташников Ю.М. Кинетика гидрохимического окисления персульфида железа (II) (пирита) азотной кислотой // *Журн. физ. химии*. 2001. Т. 75. № 5. С. 850–853.
10. Evans U.R. Behavior of metals in nitric acid // *Trans. Farad. Soc.* 1944. Vol. 40, pp. 120–130.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СОБОЛЕВ Александр Евгеньевич – кандидат химических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. Доцент кафедры химии, ФГБОУ ВО Тверской ГМУ МИНЗДРАВА России, г. Тверь, ул. Советская, д. 4. E-mail: sobolevae@tvvgmu.ru

СТАРОВОЙТОВА Наталья Юрьевна – кандидат химических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: xt-337@mail.ru

ДОЛУДА Валентин Юрьевич – доктор химических наук, заведующий кафедрой химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: doludav@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Соболев А.Е., Старовойтова Н.Ю., Долуда В.Ю. Кинетика гидрохимического окисления антимонита в растворах азотной кислоты // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2026. № 1 (29). С. 93–102.

**KINETICS OF ANTIMONITE'S HYDROCHEMICAL OXIDATION
IN SOLUTIONS OF NITRIC ACID***A.E. Sobolev^{1,2}, N.Yu. Starovoytova¹, V.Yu. Doluda¹*¹*Tver State Technical University (Tver),*²*Tver State Medical University (Tver)*

Abstract. The kinetics of hydrochemical oxidation of antimonite in solutions of nitric acid was studied using the rotating disk method and the factor experiment design. The adequate kinetic models allowing calculating the specific oxidation rate at any combination of the values of concentration of nitric acid solutions, temperature, disk rotation frequency, and duration of interaction were obtained. The oxidation process is found to proceed in a mixed mode, close to chemically controlled. Gradually, as the sediments of elemental sulfur and Sb_2O_5 accumulate on the disk surface, the process becomes controlled by internal diffusion. The obtained kinetic characteristics enlarge the database on hydrochemical oxidation kinetics of sulphides and can be used for the elaboration of the recommendations for the effective comprehensive exploitation of antimony-bearing ores and concentrates.

Keywords: antimonite (antimony(III) sulfide), nitric acid, hydrochemical oxidation, kinetics.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SOBOLEV Alexander Evgenevich – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. Associate Professor of the Department of Chemistry, Tver State Medical University (TvSMU) of the Ministry of Health of the Russian Federation, 4, Sovetskaya Street, Tver. E-mail: sobolevae@tvgmu.ru

STAROVOITOVA Natalia Yurievna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: xt-337@mail.ru

DOLUDA Valentin Yuryevich – Doctor of Chemical Sciences, Head of Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: doludav@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Sobolev A.E., Starovoytova N.Yu., Doluda V.Yu. Kinetics of antimonite's hydrochemical oxidation in solutions of nitric acid // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2026. No. 1 (29), pp. 93–102.

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Учредитель и издатель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Адрес редакции: 170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22

Тел. редакции: +7 (4822) 78-89-00. **E-mail:** common@tstu.tver.ru

Главный редактор

Гультияев В.И. – д.т.н., доцент ТвГТУ

Ответственный секретарь

Новиченкова Т.Б. – к.т.н., доцент ТвГТУ

Члены редакционной коллегии:

Алиферов А.И. – д.т.н., профессор НГТУ

Белов В.В. – д.т.н., профессор ТвГТУ

Березовский Н.И. – д.т.н., профессор Белорусского национального технического университета, г. Минск, Республика Беларусь

Болотов А.Н. – д.т.н., профессор ТвГТУ

Бронштейн Л.М. – к.х.н., с.н.с., химический факультет Индианского университета, г. Блумингтон, США

Ковалев К.Л. – д.т.н., профессор МАИ

Колесников А.С. – к.т.н., профессор Южно-Казахстанского университета им. Ауэзова М., г. Шымкент, Республика Казахстан

Корнеев К.Б. – к.т.н., доцент ТвГТУ

Косивцов Ю.Ю. – д.т.н., профессор ТвГТУ

Макаров А.Н. – д.т.н., профессор ТвГТУ

Матар П.Ю. – к.т.н., HDR, профессор Ливанского университета, г. Бейрут, Ливан

Матвеева В.Г. – д.х.н., профессор ТвГТУ

Назарова М.Ю. – д.т.н., профессор НИУ БелГУ

Петропавловская В.Б. – д.т.н., доцент ТвГТУ

Самченко С.В. – д.т.н., профессор НИУ МГСУ

Севостьянов А.А. – к.т.н., доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Строкова В.В. – д.т.н., профессор БГТУ им. В.Г. Шухова

Сульман М.Г. – д.х.н., профессор ТвГТУ

Трещев А.А. – д.т.н., профессор ТулГУ

Чернышева Н.В. – д.т.н., профессор БГТУ им. В.Г. Шухова

Шифрина З.Б. – д.х.н., заведующая лабораторией макромолекулярной химии, Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН

Федюк Р.С. – д.т.н., доцент Дальневосточного федерального университета

Ясинская Н.Н. – д.т.н., доцент Витебского государственного технологического университета, г. Витебск, Республика Беларусь

**ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал
№ 1 (29), 2026

Редактор М.Б. Юдина
Корректор С.В. Зорикова

Дата выхода в свет 04.09.2026

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
Адрес издателя: 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22