

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 (25), 2025

Тверь 2025

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2025. № 1 (25). 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: ПИ № ФС77-74328 (печатн.) от 19 ноября 2018 г., Эл № ФС77-74949 (онлайн) от 25 января 2019 г.

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

ISSN 2658-7459 (печатн.)

ISSN 2686-794X (онлайн)

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Белов В.В., Микаелян Х.А.</i> Конструкционный газобетон неавтоклавного твердения для монолитного малоэтажного строительства	5
<i>Гуревич Т.М., Примакина Е.И.</i> Оценка влияния восстанавливаемой части Ильинской церкви на существующие конструкции.....	11
<i>Михайлов А.Г., Демченко И.И., Игнатова О.С.</i> Гомогенизация дисперсных материалов виброакустической дезинтеграцией	25
<i>Пешехонов А.А., Рудакова И.В., Черникова А.В., Кузьмина С.Н.</i> Энергосберегающее управление расходом зернистых сыпучих материалов	34

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Корнеев К.Б., Маньков М.Б.</i> Повышение ресурсных характеристик аккумуляторных батарей за счет использования метода управляемой десульфатации	44
<i>Маринова С.В.</i> Особенности метрологической надежности микропроцессорных счетчиков электроэнергии	53
<i>Павлов В.Д.</i> Интерпретация результатов измерения кванта магнитного потока.....	61
<i>Попов И.П.</i> Магнитный заряд. Осевое взаимодействие проводников с токами.....	67
<i>Шум Ал.А., Ветошкин А.М.</i> Теорема о линиях n -симметрии выпуклой плоской пластины.....	74

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Григорьев М.Е., Соловьев К.Э.</i> Рутенийсодержащий катализатор для гидрирования фруктозы.....	82
<i>Петрова А.И., Цветков Д.Ю., Лакина Н.В., Долуда В.Ю., Сидоров А.И.</i> Оптимизация условий получения метионата кальция	88
<i>Цветков Д.Ю., Петрова А.И., Лакина Н.В., Долуда В.Ю., Сидоров А.И.</i> Количественное определение меди в хелатном комплексе с метионином методом рентгенофлуоресцентного анализа	95

CONTENTS

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<i>Belov V.V., Mikaelyan K.A.</i> Structural aerated concrete of non-autoclave hardening for monolithic low-rise construction.....	5
<i>Gurevich T.M., Primakina E.I.</i> Assessment of the impact of the restored part of the Elijah church on existing structures	11
<i>Mikhailov A.G., Demchenko I.I., Ignatova O.S.</i> Homogenization of dispersed materials by vibro-acoustic disintegration.....	25
<i>Peshekhonov A.A., Rudakova I.V., Chernikova A.V., Kuzmina S.N.</i> Power saving granular bulk flow control.....	34

ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Korneev K.B., Mankov M.B.</i> Increase in the life characteristics of batteries by using the controlled desulphation method.....	44
<i>Marinova S.V.</i> Peculiarities of metrological reliability of microprocessor-based electricity meters	53
<i>Pavlov V.D.</i> Interpretation of magnetic flux quantum measurement results.....	61
<i>Popov I.P.</i> Magnetic charge. Axial interaction of conductors with currents.....	67
<i>Shum A.A., Vetoshkin A.M.</i> The theorem on the n -symmetry lines of a convex flat plate....	74

CHEMICAL TECHNOLOGY

<i>Grigoriev M.E., Solovyov K.E.</i> Ruthenium-containing catalyst for fructose hydrogenation.....	82
<i>Petrova A.I., Tsvetkov D.Yu., Lakina N.V., Doluda V.Yu., Sidorov A.I.</i> Optimization of conditions for obtaining calcium methionate.....	88
<i>Tsvetkov D.Yu., Petrova A.I., Lakina N.V., Doluda V.Yu., Sidorov A.I.</i> Quantitative determination of copper in a chelated complex with methionine by x-ray fluorescence analysis.....	95

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 691.327.332

КОНСТРУКЦИОННЫЙ ГАЗОБЕТОН НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ ДЛЯ МОНОЛИТНОГО МАЛОЭТАЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

В.В. Белов, Х.А. Микаелян*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Белов В.В., Микаелян Х.А., 2025

Аннотация. В статье разработаны технологические основы получения конструкционного газобетона неавтоклавного твердения для монолитного малоэтажного строительства с применением полимерцементного вяжущего и отходов производства стеклянных микросфер. Отмечено, что одним из ключевых аспектов исследования является использование полимерных добавок, которые улучшают физико-механические свойства материала и повышают его долговечность; при этом отходы производства стеклянных микросфер, в свою очередь, являются эффективным микронаполнителем газобетона, усиливающим его физико-механические свойства. Сделан вывод, что разработанный газобетон неавтоклавного твердения может быть конкурентоспособным малоэнергоёмким конструкционным материалом для монолитного малоэтажного строительства, обладающим также и теплоизоляционными функциями.

Ключевые слова: конструкционный газобетон, неавтоклавный, полимерцементное вяжущее, прочность, плотность, модификация газобетона, отходы производства стеклянных микросфер.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-5-11

ВВЕДЕНИЕ

Газобетон – это популярный стеновой материал, который идеально подходит для малоэтажного строительства [1, 2]. Его разновидность, а именно неавтоклавный газобетон, представляет собой одну из перспективных альтернатив традиционным стеновым материалам, таким как керамический и силикатный кирпич, и при этом обладает уникальными свойствами и преимуществами перед традиционными строительными материалами, прежде всего лучшими показателями тепло- и звукоизоляции. Неавтоклавные газобетонные изделия, если сравнивать с газобетонами автоклавного твердения, менее трудоемки в производстве, не требуют использования дорогостоящего оборудования. Основным недостатком материала является более медленный набор прочности в производственном цикле в отличие от автоклавных газобетонов, но благодаря гидравлическому вяжущему (цементу) данный материал устойчив к воздействию влажной среды, которая обеспечивает процесс гидратации цементного вяжущего [3–5].

Существует множество исследований, посвященных неавтоклавным газобетонам, которые производятся с использованием композиционных вяжущих различных типов, составов и методов получения. Эти работы в целом демонстрируют эффективность и

перспективность данного направления. Однако одним из их ключевых недостатков является то, что свойства используемых вяжущих и характеристики готовых ячеистых бетонов зачастую рассматриваются отдельно друг от друга [6].

Для получения изделий с высокой прочностью необходимо создать материал с минимальным количеством дефектов. Формирование оптимальной структуры неавтоклавного газобетона зависит от параметров, определяющих кинетику газообразования (добавки газообразователя, щелочи, их соотношения и др.), и параметров, регулирующих скорость увеличения пластической прочности ячеистого бетона в процессе его твердения [7].

В этом отношении ключевую роль могут сыграть полимерные добавки. Например, при добавлении поливинилацетата (ПВА) прочность полимерцемента при растяжении и изгибе увеличивается в 2–2,5 раза по сравнению с обычным цементом. Однако если полимер не обладает достаточной водостойкостью, то при увлажнении прочность полимерцемента может снизиться. При содержании полимера в количестве 20–25 % клеящая способность полимерцемента приближается к свойствам чистого полимера [8].

В работах [9, 10] исследованы различные аспекты влияния полимеров и условий отверждения на прочность цементных связующих материалов. Прочностные характеристики материалов на основе портландцемента в значительной степени зависят от условий их затвердевания. Если процесс происходит во влажной среде, то полимерная пленка замедляет испарение воды, что способствует лучшей гидратации частиц. Однако это тормозит скорость процесса. При водном твердении или во влажных условиях формирование полимерной структуры происходит медленнее, что приводит к снижению прочностных показателей, особенно при изгибающих нагрузках. Рекомендуется использовать комбинированный режим, который включает 7–10 дней твердения образцов во влажной среде с последующей воздушно-сухой гидратацией при относительной влажности 40–60 % [9, 10].

Актуальную задачу улучшения физико-механических и эксплуатационных характеристик неавтоклавного газобетона можно решать также за счет использования микронаполнителей, которые обеспечивают высокие прочностные характеристики на границах раздела фаз [11]. Мировой опыт показывает, что в качестве таких наполнителей целесообразно применять материалы из отходов промышленности, обеспечивающие экономический и экологический эффекты, а также материалы из отходов, имеющих шарообразную форму частиц. Например, использование золы-уноса со сферическими частицами размером 5–15 мкм придает сырьевым смесям свойство, которое получило название «шарикоподшипниковый эффект». Благодаря данной особенности улучшается скольжение цемента и песка по стекловидной поверхности частичек золы. Такой пластифицирующий эффект позволяет уменьшить содержание воды в бетонной смеси, что способствует повышению прочности бетона [12].

Исходя из вышеуказанного, можно предположить, что отходы производства стеклянных микросфер, применяемых в качестве эффективного мелкодисперсного пустотелого наполнителя при изготовлении бетонов [13–15], за счет высокой дисперсности и шарообразной формы [16] могут стать ценным сырьевым компонентом неавтоклавного газобетона, снижающим его стоимость и улучшающим, наряду с использованием полимерцементного вяжущего, физико-механические свойства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе изучались возможности получения оптимального состава газобетонной смеси с использованием полимера в качестве добавки и отхода производства стеклянных микросфер. Для этого были изготовлены и испытаны на прочность газобетонные образцы с различным полимерцементным отношением и разным содержанием алюминиевой пудры при фиксированном содержании отхода производства стеклянных микросфер в качестве микронаполнителя.

Использовались следующие компоненты: цемент ЦЕМ I 42,5Н; отходы производства стеклянных микросфер; керамзитовый песок с фракцией 0–5 мм; каустическая сода, алюминиевая пудра, сульфолон, суперпластификатор, полимер ПВА.

Удобоукладываемость смесей была подобрана предварительно путем варьирования расхода воды таким образом, чтобы диаметр расплыва лепешки из цилиндра Суттарда не вспученной смеси (без газообразователя) составлял около 16 см.

Из газобетонной смеси изготавливались образцы в виде кубов размерами 100 × 100 × 100 мм. После формования образцы твердели 1 сут в формах. Затем образцы распалубливали и отправляли в камеру нормального твердения на 14 сут при 20 ± 2 °С и влажности 85–90 %.

Испытания образцов на сжатие в высушенном состоянии проводили в соответствии с ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Перед испытанием образцы измеряли, взвешивали и проверяли на различные дефекты.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

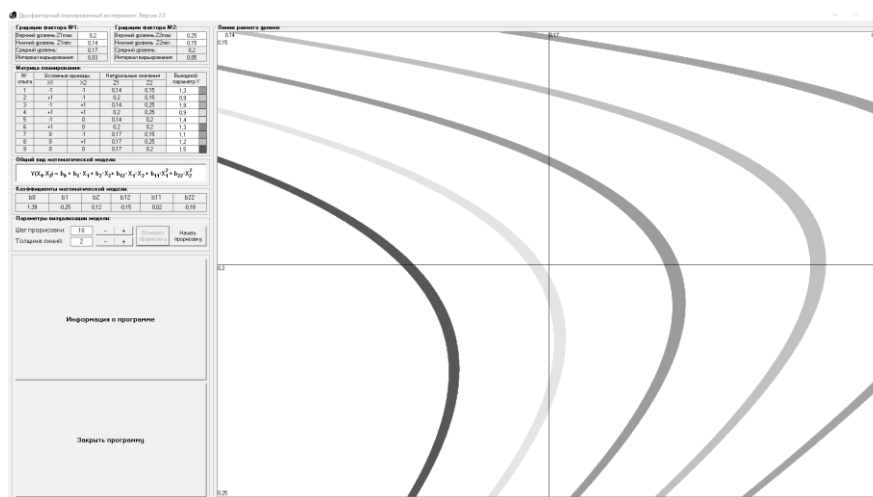
Спланирован и выполнен полный двухфакторный эксперимент для проверки составов газобетонной смеси. Каждый фактор рассматривался лишь на трех фиксированных уровнях (верхнем, среднем и нижнем). В качестве первого фактора было принято содержание алюминиевой пудры, равное 0,14–0,20 %, в качестве второго – полимерцементное отношение (П/Ц), равное 0,15–0,25.

В таблице приведены результаты определения плотности и прочности образцов неавтоклавного газобетона в возрасте 14 сут.

Экспериментальные данные

Номера составов	Содержание алюминиевой пудры, %	П/Ц	Средняя плотность образцов в возрасте 14 сут (в сухом состоянии), кг/м ³	Прочность на сжатие в возрасте 14 сут, МПа	Коэффициент конструктивного качества
1	0,14	0,15	600	1,43	2,39
2		0,2	715	1,73	2,42
3		0,25	730	2,51	3,44
4	0,17	0,15	535	1,11	2,08
5		0,2	710	1,69	2,38
6		0,25	625	1,21	1,93
7	0,20	0,15	840	1,05	1,26
8		0,2	715	1,41	1,97
9		0,25	655	0,98	1,49

Ниже приведены результаты проведенного эксперимента в виде визуализации полученной модели (рисунок), а также сама математическая модель второго порядка, описывающая зависимость прочности (y) от содержания алюминиевой пудры (x_1) и П/Ц (x_2): $y = 1,39 - 0,25x_1 + 0,12x_2 - 0,15x_1x_2 + 0,02x_1^2 - 0,18x_2^2$, где x_1 и x_2 – рецептурные факторы в кодированном виде.



Визуализация модели ПФЭ

Наилучшими результатами характеризуется состав № 3 (содержание алюминиевой пудры 0,14 %, П/Ц = 0,25), при этом коэффициент конструкционного качества равен 3,4, т.е. материал имеет высокую прочность, равную 2,5 МПа, при оптимальной плотности, равной 730 кг/м³.

Полученные результаты можно объяснить тем, что добавление полимерных добавок в состав бетона способствует улучшению его прочностных характеристик. Полимерное связующее вещество образует упругие прослойки между кристаллическими новообразованиями минерального вяжущего, а также адсорбируется на поверхности частиц заполнителя. За счет своих высоких адгезионных свойств оно повышает прочность бетона.

При П/Ц до 0,2–0,25 гидратные фазы образуют кристаллизационно-коагуляционную структуру. Эта структура укрепляется в местах с дефектами (порами и трещинами) полимерной составляющей, что приводит к формированию более прочной и эластичной структуры. Увеличение П/Ц с 0,15 до 0,25 способствует повышению прочности образцов с 1,4 до 2,5 МПа соответственно.

Плотность образцов определяется количеством алюминиевой пудры. При увеличении ее содержания плотность материала уменьшается. Таким образом, плотность варьируется в диапазоне от 530 до 840 кг/м³.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование полимерцементного связующего способствует улучшению сцепления между частицами газобетона, что, в свою очередь, повышает прочность последнего. Отходы производства стеклянных микросфер, выступая в качестве микроармирующего компонента, уменьшают усадку материала и продлевают срок его службы.

Применение полимера ПВА и отходов производства стеклянных микросфер в производстве конструкционного газобетона неавтоклавного твердения позволило улучшить его характеристики. Прочность материала достигала 2,5 МПа, а плотность варьировалась в диапазоне от 530 до 840 кг/м³. Это открывает новые возможности для использования такого газобетона в строительстве различных объектов, в том числе в малоэтажном строительстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжих В.Д., Тарасенко В.Н. Ячеистые бетоны как основной стеновой материал в малоэтажном жилищном строительстве. *Инновации в науке и практике: Сборник статей по материалам IV Международной научно-практической конференции. Часть I*. Барнаул: ООО «Дендра», 2017. С. 184–188.
2. Лхасаранов С.А., Урханова Л.А., Смирнягина Н.Н., Назарова К.Х. Применение композиционных вяжущих и углеродного наноматериала для получения газобетона // *Строительные материалы*. 2021. № 1-2. С. 30–35.
3. Сидоренко А.Г. Преимущества использования неавтоклавных газобетонов в строительстве. *Теоретические и практические аспекты развития современной науки: теория, методология, практика: Сборник научных статей по материалам XIII Международной научно-практической конференции*. Уфа: ООО «Научно-издательский центр "Вестник науки"», 2024. С. 100–103.
4. Дюсембинов Д.С., Сабитов Е.Е. Модифицированные газобетонные изделия неавтоклавного твердения. *Повышение качества образования, современные инновации в науке и производстве: Сборник трудов Международной научно-практической конференции*. Экибастуз: Издательство филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2017. С. 347–350.
5. Сидоренко А.Г. Экологические аспекты производства неавтоклавного газобетона. *Молодой ученый: Сборник статей VIII Международной научно-практической конференции*. Пенза: Наука и Просвещение, 2024. С. 66–68.
6. Лесовик В.С., Абсиметов М.В., Елистраткин М.Ю., Поспелова М.А., Шаталова С.В. К вопросу изучения особенностей структурообразования композиционных вяжущих для неавтоклавных газобетонов // *Строительные материалы и изделия*. 2019. Т. 2. № 3. С. 41–47.
7. Леонтьев С.В., Галкина М.Д. Исследование влияния технологических факторов на процессы формирования структуры неавтоклавного газобетона // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2021. Т. 1. С. 314–318.
8. Темный В.Д., Мишин Д.А. Получение полимерцементного вяжущего. *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова*. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. С. 2632–2635.
9. Ахметвалиев Н.Н. Прочностные характеристики полимерцементного вяжущего // *Студенческий форум*. 2019. № 2 (53). С. 28–31.
10. Темный В.Д., Богат А.Р., Колчева А.А., Нищук О.П. Влияние условий твердения портландцемента с добавкой ПВА на его прочностные показатели. *Международная научно-техническая конференция молодых ученых молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова*. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. С. 3464–3468.

11. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Полые микросферы – эффективный наполнитель для высокопрочных легких бетонов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2013. № 10. С. 80–83.
12. Молчанов А.О., Нелюбова В.В., Кузьмина Н.О. Некоторые свойства зол-уноса как компонента бетонных смесей // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2017. Т. 8. № 5–1. С. 102–106.
13. Бочарников А.Л., Загороднюк Л.Х. Перспективы применения. Полых стеклянных микросфер. *Наука и инновации в строительстве: Сборник докладов VII Международной научно-практической конференции, посвященной 170-летию В.Г. Шухова*. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. Т. 2. С. 139–142.
14. Трофимов А.Н., Плешков Л.В., Байков А.В., Стогова И.В. Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Часть 1. О размерах промышленных полых стеклянных микросфер // *Пластические массы*. 2020. № 11–12. С. 15–19.
15. Перфилов В.А., Котляревская А.В., Канавец У.В. Влияние полых стеклянных микросфер на свойства легких мелкозернистых бетонов // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2016. № 43 (62). С. 93–103.
16. Трофимов А.Н., Белов В.В., Вологин Н.А., Косолапов А.Ф., Шишаев Д.С. Отходы стеклянных микросфер как потенциальное сырье для получения строительных материалов // *Техника и технология силикатов*. 2024. Т. 31. № 3. С. 237–246.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

МИКАЕЛЯН Хачатур Арсенович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: xach200@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В., Микаелян Х.А. Конструкционный газобетон неавтоклавного твердения для монолитного малоэтажного строительства // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 1 (25). С. 5–11.

STRUCTURAL AERATED CONCRETE OF NON-AUTOCCLAVE HARDENING FOR MONOLITHIC LOW-RISE CONSTRUCTION

V.V. Belov, K.A. Mikaelyan
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The paper develops the technological basis for the production of structural aerated concrete of non-autoclave curing for monolithic low-rise construction with the use of polymer cement binder and glass microsphere production waste. It is noted that one of the key

aspects of the study is the use of polymer additives that improve the physical and mechanical properties of the material and increase its durability, and glass microsphere production wastes, in turn, are an effective microfiller of aerated concrete, increasing its physical and mechanical properties. According to the results of the study, it is concluded that the developed non-autoclaved aerated concrete can be a competitive low-energy-intensive structural material for monolithic low-rise construction, combining also thermal insulation functions.

Keywords: structural aerated concrete, non-autoclave, polymer, polymer cement binder, strength, density, modification of aerated concrete, waste from the production of glass microspheres.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

MIKAELIAN Khachatur Arsenovich – Master's Degree Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: xach200@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V., Mikaelyan K.A. Structural aerated concrete of non-autoclave hardening for monolithic low-rise construction // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 1 (25), pp. 5–11.

УДК 721.011:624.074

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ ЧАСТИ ИЛЬИНСКОЙ ЦЕРКВИ НА СУЩЕСТВУЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ

Т.М. Гуревич, Е.И. Примакина

*Костромская государственная сельскохозяйственная академия
(Костромская область, пос. Караваево)*

© Гуревич Т.М., Примакина Е.И., 2025

Аннотация. В данной работе приведены результаты исследования влияния восстанавливаемой части культового сооружения на существующие конструкции. Представлены результаты расчетов нескольких пространственных моделей сооружения. Сделаны выводы о целесообразности восстановления объекта согласно проектному решению.

Ключевые слова: восстановление, фундаменты, своды, расчетные модели, осадки, напряжения.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-11-24

Церковь Святого Илии Пророка по улице Советской (бывшей Русиной) является одним из архитектурных памятников г. Костромы. Церковь располагается в начале улицы, непосредственно за зданием бывшей гостиницы «Старый двор». В период своего существования сооружение претерпело ряд конструктивных и архитектурных изменений [1–3].

В 1930 г. церковное здание было частично разрушено: разобраны до фундаментов алтарь и четверик, уничтожены два верхних яруса колокольни. Сохранились трапезная и первый ярус колокольни (рис. 1).



Рис. 1. Храм Святого Пророка Илии. Фото 1930 г.

В настоящее время разработан проект реконструкции храма, исполнителем выступает ООО «ФедорБюро». В 2016 г. начались восстановительные работы.

В результате проделанных работ открылись частично сохранившиеся фрески на сводах и стенах (рис. 2). Практически сразу встал вопрос об их консервации и о возможности хотя бы частичного восстановления утраченных росписей. Предварительная экспертиза показала, что необходимо проведение дорогостоящих мероприятий по сохранению фресок.



Рис. 2. Фрагменты фресок в Ильинском храме

К настоящему моменту по проекту ООО «ФедорБюро» восстановлены второй и третий ярусы колокольни на основе фотографий начала XX в. (рис. 3, 4).

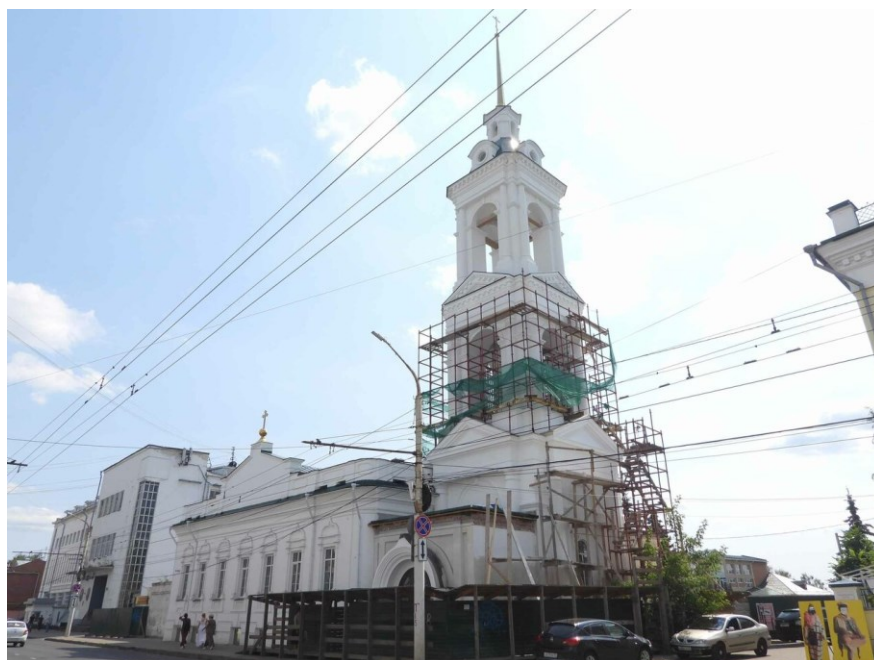
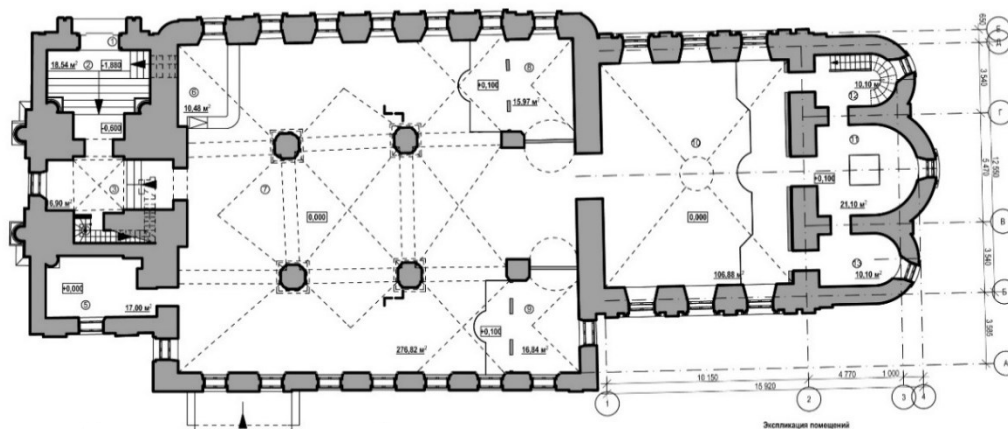


Рис. 3. Церковь Святого Пророка Илии. Фото 2021 г.



Рис. 4. Церковь Святого Пророка Илии (восточный фасад). Фото 2023 г.

Нами были выполнены расчеты нескольких моделей здания с использованием ПК ЛИРА-САПР [4–6]. За основу были взяты проектные материалы, предоставленные ООО «ФедорБюро» (рис. 5, 6) и ООО «Волга-44», а также технический отчет ООО «Промстройизыскания».



14

В расчетах учитывались следующие нагрузки: собственный вес здания, вес маковиц, полезная нагрузка на перекрытия, вес стяжки на своды подклета, нагрузки от насыпного грунта, снеговая нагрузка.

Предварительно была сформирована **модель № 1** сооружения, соответствующая состоянию до разрушения (рис. 7).

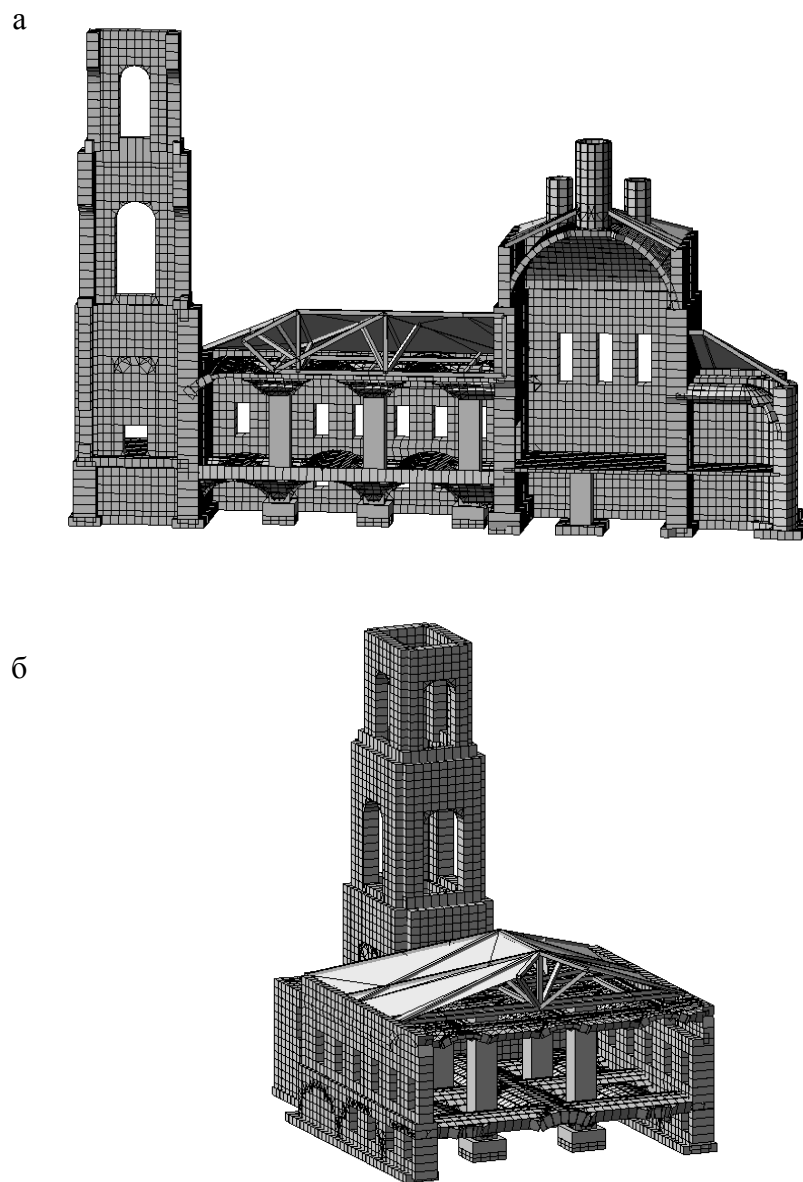


Рис. 7. Пространственная модель сооружения до разрушения:
а – разрез; б – общий вид

На основании данных инженерно-геологических изысканий, предоставленных ООО «Промстройизыскания», сформирован грунтовой массив (рис. 8).

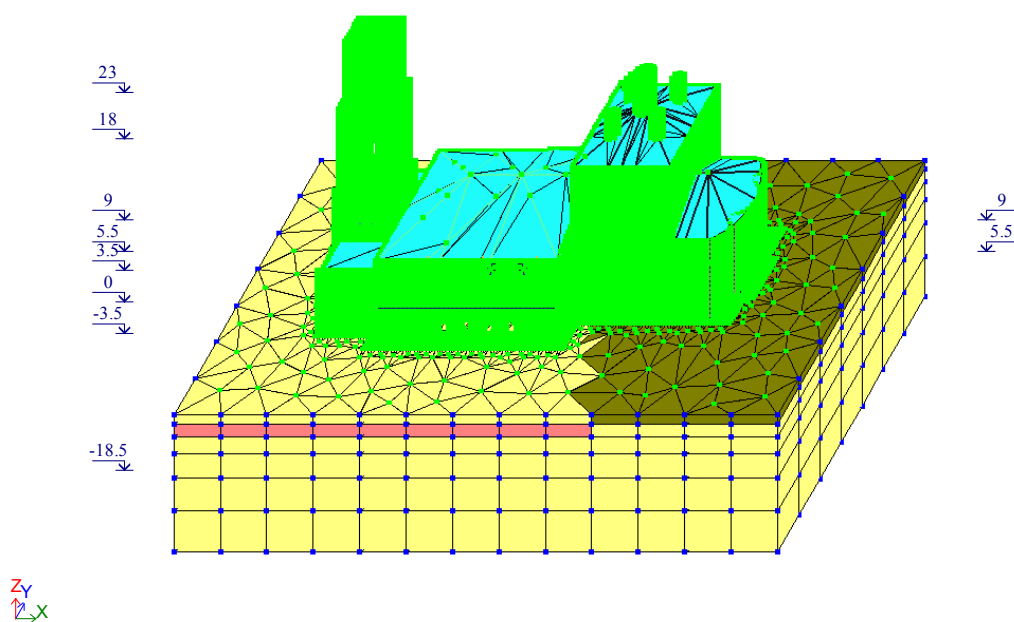


Рис. 8. Модель сооружения на грунтовом массиве

Максимальная осадка фундамента от нормативных нагрузок составила 52,7 мм (рис. 9).

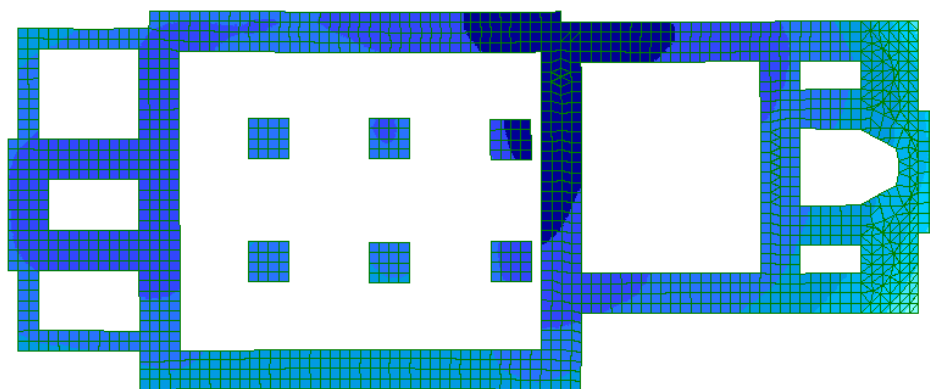
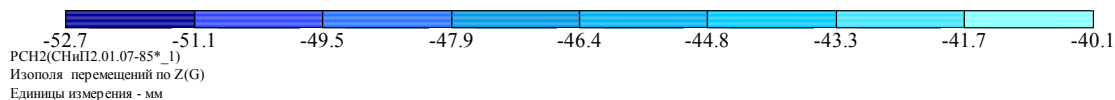


Рис. 9. Осадки фундамента от нормативных нагрузок

Максимальный прогиб сводов от нормативных нагрузок составил 5,4 мм (рис. 10).

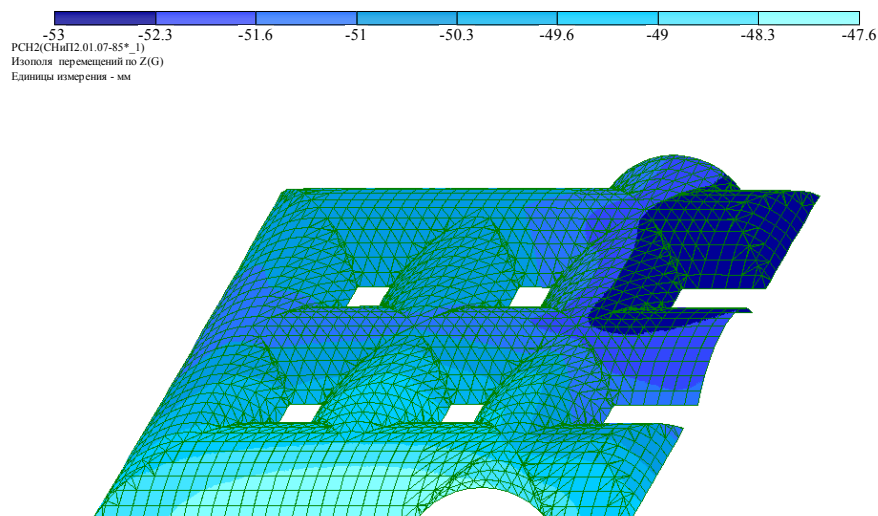


Рис. 10. Вертикальные перемещения сводов над трапезной от нормативных нагрузок

Максимальные главные растягивающие напряжения в сводах от расчетных нагрузок составили 0,176 МПа в среднем слое (рис. 11). Полученные величины растягивающих напряжений в элементах сводов не превышают расчетного сопротивления кладки $R_{\text{тб}} = 0,25$ МПа. Аналогичный характер распределения напряжений подтверждается результатами, полученными в работах [7–9].

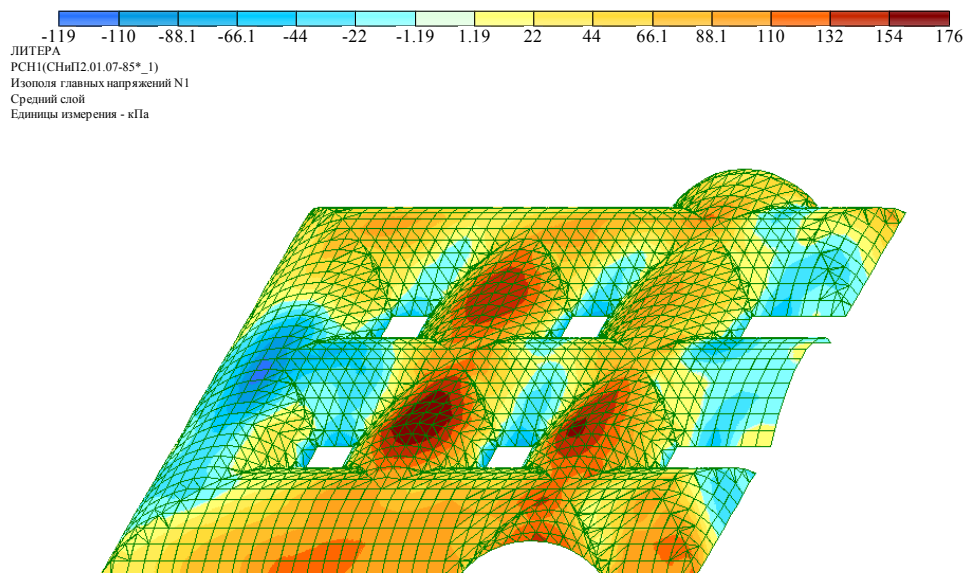


Рис. 11. Главные напряжения N1 в сводах трапезной (средний слой)

Наряду с вышеуказанным сформирована модель № 2 сооружения, соответствующая его состоянию на сегодняшний момент (рис. 12).

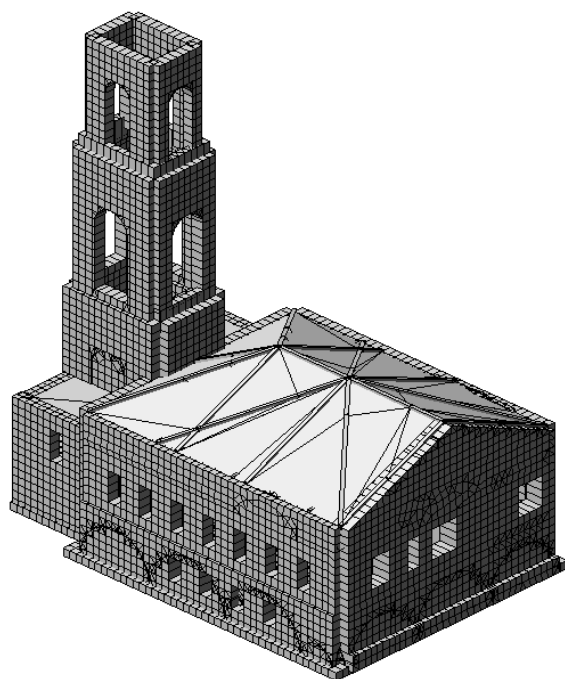


Рис. 12. Пространственная модель существующего сооружения

Максимальная осадка фундамента от нормативных нагрузок составила 50,5 мм (рис. 13).

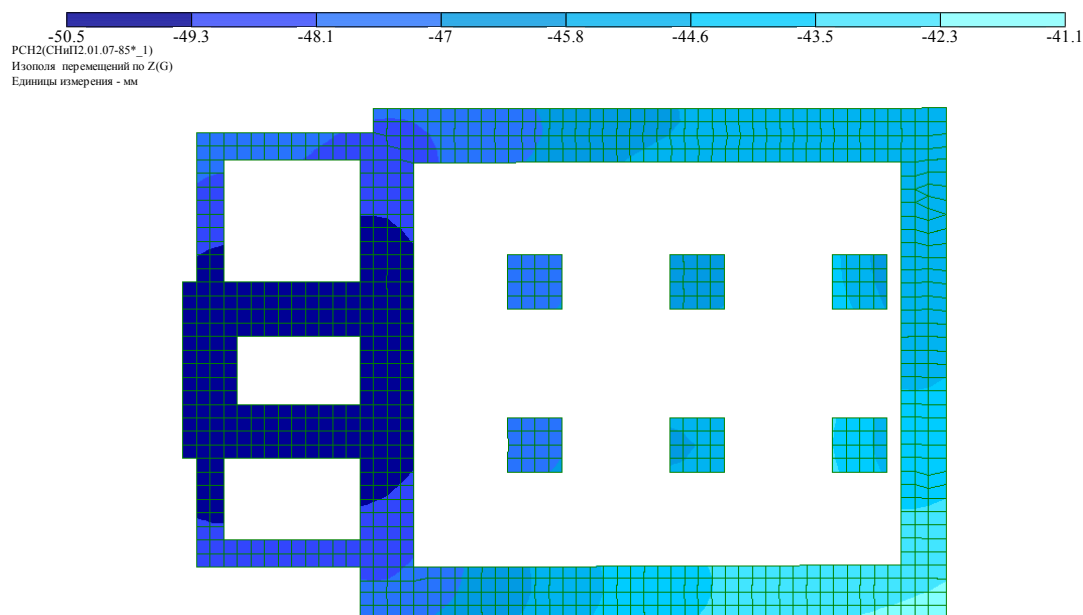


Рис. 13. Осадки фундамента существующего сооружения от нормативных нагрузок

Максимальный прогиб сводов от нормативных нагрузок составил 7,6 мм (рис. 14).

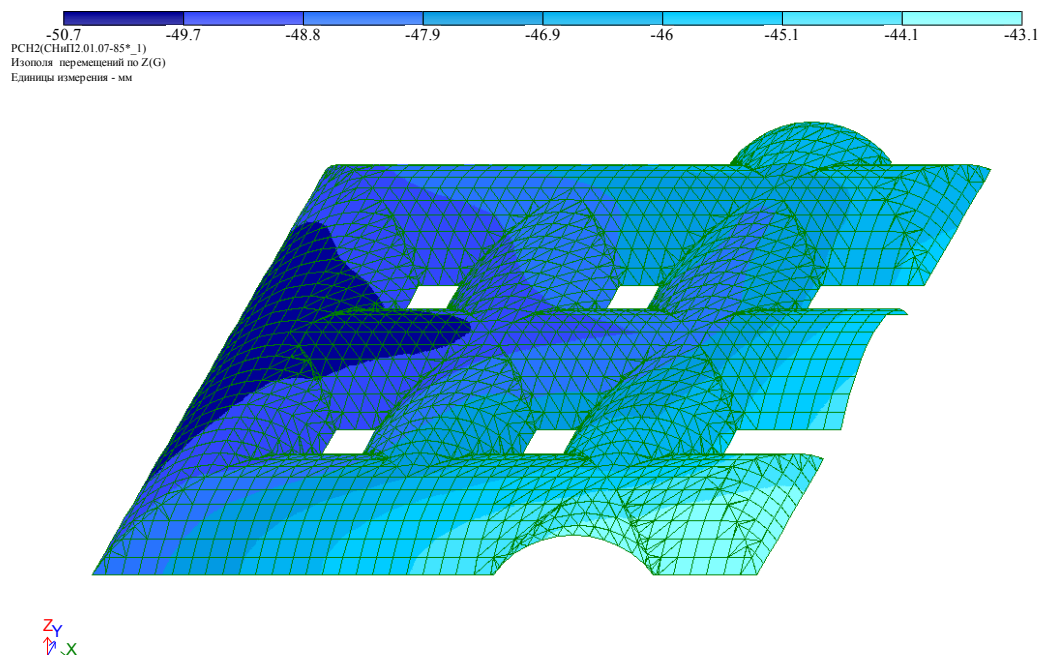


Рис. 14. Вертикальные перемещения сводов над трапезной существующего здания от нормативных нагрузок

Максимальные главные растягивающие напряжения в сводах от расчетных нагрузок составили 0,237 МПа в среднем слое (рис. 15). Полученные значения растягивающих напряжений в элементах сводов близки к расчетному сопротивлению кладки $R_{тб} = 0,25$ МПа.

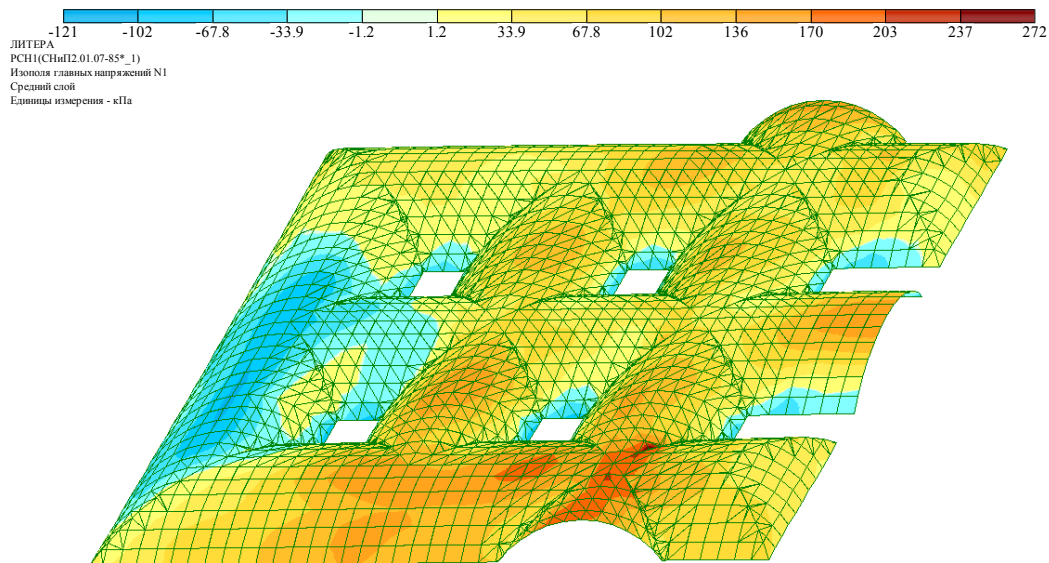


Рис. 15. Главные напряжения N1 в сводах трапезной существующего здания (средний слой)

Сформирована **модель № 3** сооружения, соответствующая проекту восстановления здания (рис. 16). В проекте ООО «Волга-44» предусмотрено устройство шпунта из швеллера 20 между существующей стеной здания и стеной четверика. Глубина погружения шпунта под подошву плитного фундамента составляет 1,8 м. Нами рассмотрены четыре варианта модели, которые позволяют оценить влияние шпунта на напряженно-деформированное состояние конструкций сооружения.

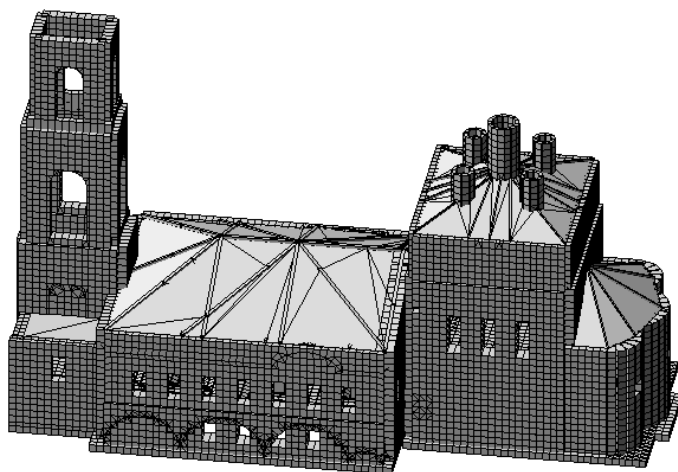


Рис. 16. Пространственная модель сооружения после восстановления

Максимальная осадка фундамента от нормативных нагрузок составила 68,4 мм (рис. 17).

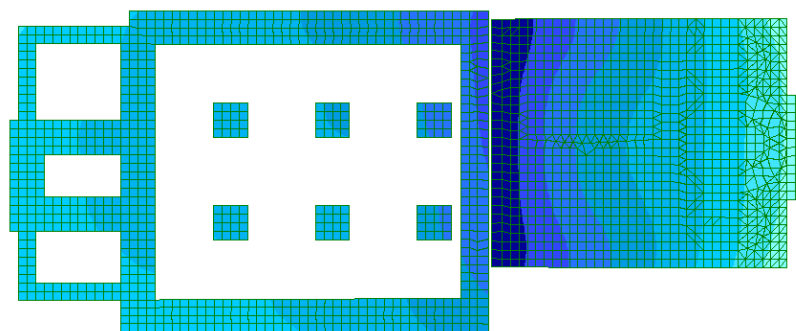
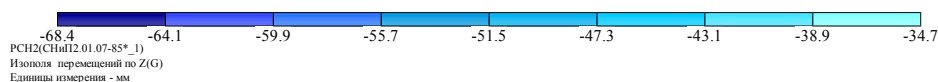


Рис. 17. Осадки фундамента от нормативных нагрузок (модель без шпунта)

Максимальный прогиб сводов от нормативных нагрузок составил 14,5 мм (рис. 18).

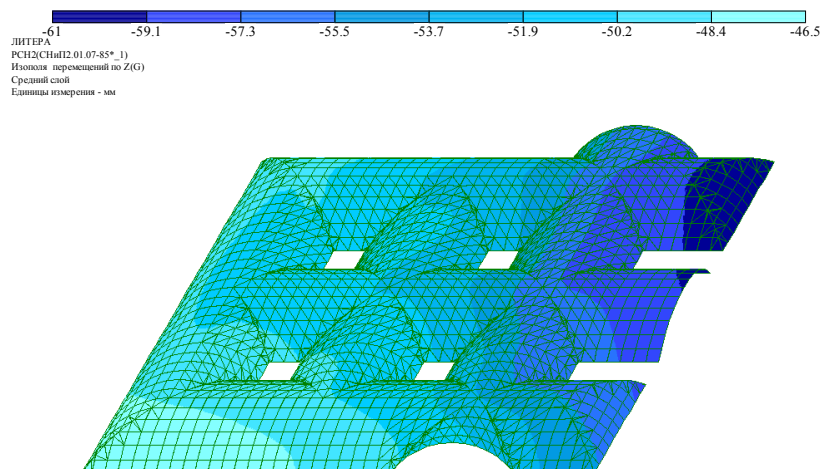


Рис. 18. Вертикальные перемещения сводов над трапезной от нормативных нагрузок (модель без шпунта)

Максимальные главные растягивающие напряжения в сводах от расчетных нагрузок составили 0,387 МПа в среднем слое (рис. 19). Как видно, растягивающие напряжения в элементах сводов превышают расчетное сопротивление кладки $R_{tb} = 0,25$ МПа.

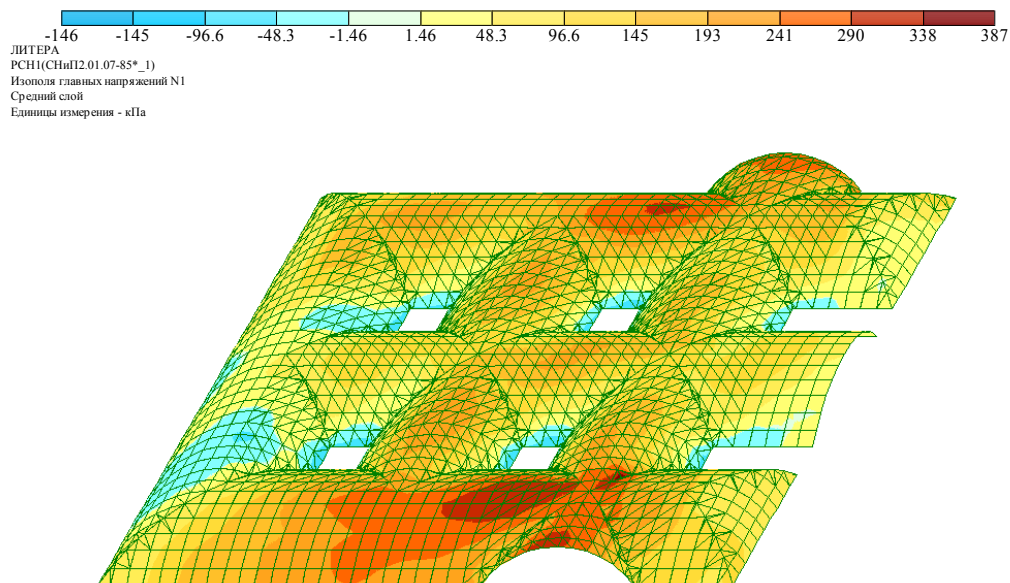


Рис. 19. Главные напряжения N1 в сводах трапезной (средний слой, модель без шпунта)

В результате расчетов найдены дополнительные осадки основания стены трапезной от воздействия восстанавливаемой части (четверика с алтарем). Результаты расчета моделей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов моделей

Модель	Диапазон осадок фундамента, мм	Дополнительные осадки существующей части, мм	Максимальные растягивающие напряжения N1 в сводах над трапезной, кПа
Без шпунта	$52 \leq z \leq 61,2$	15,4	378
Шпунт 1,8 м	$47 \leq z \leq 57$	11,2	354
Шпунт 4 м	$46,9 \leq z \leq 55,9$	10,1	342
Шпунт 7 м	$46,8 \leq z \leq 55$	9,2	275

Характер изменения напряженно-деформированного состояния основания существующего объекта, расположенного в зоне влияния нового строительства, соответствует результатам исследований [10, 11].

Можно отметить, что дополнительные осадки находятся в допустимых пределах. Однако растягивающие напряжения в сводах над трапезной превышают расчетное сопротивление кирпичной кладки на растяжение $R_{\text{тб}} = 0,25$ МПа, поскольку напряжения в сводах зависят не только от осадок, но и от горизонтальных смещений (табл. 2).

Таблица 2

Горизонтальные смещения сводов над трапезной от нормативных нагрузок

Максимальные перемещения, мм	До разрушения	После восстановления без шпунта	После восстановления со шпунтом 7 м
По оси X	0,635	6,38	2,55
По оси Y	1,53	2,64	1,88

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы. Система сводов над трапезной представляет собой уникальную конструкцию с частично сохранившимися фресками, подлежащими консервации и восстановлению. Грунты, служащие основанием для фундамента сооружения, неоднородны и имеют значительную глубину сжимаемой толщи (13,8 м). Растягивающие напряжения в сводах над трапезной до разрушения, а также после частичного разрушения и восстановления колокольни не превышали расчетного сопротивления кладки.

Дополнительные осадки существующей части здания под влиянием вновь восстанавливаемой части (при наличии шпунта глубиной не менее 4 м) находятся в допустимых пределах. Расчеты показывают, что растягивающие напряжения в сводах над трапезной после восстановления утраченной части будут иметь недопустимые значения даже при устройстве шпунта, что может повлечь за собой постепенное разрушение уникальной конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич Т.М., Черепенин Г.В., Рыжов А.С. Основные методы и принципы реставрации памятников истории и культуры. *Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 69-й Международной научно-практической конференции: в 3 т.* Караваево: Костромская ГСХА, 2018. Т. 2. С. 9–16.
2. Гуревич Т.М., Плюснина Н.М. Варианты конструктивных решений при частичном восстановлении исторических зданий. *Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 69-й Международной научно-практической конференции: в 3 т.* Караваево: Костромская ГСХА, 2018. Т. 2. С. 16–21.
3. Гуревич Т.М., Салахутдинова П.Ю., Плюснина Н.М. История церкви Святого Илии Пророка по улице Советской в городе Костроме. *Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 69-й Международной научно-практической конференции: в 3 т.* Караваево: Костромская ГСХА, 2018. Т. 2. С. 26–31.
4. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. Киев: Факт, 2005. 344 с.
5. Перельмутер А.В. Расчетные модели сооружений и возможности их анализа. М.: ДМК Пресс, 2007. 600 с.
6. Гуревич Т.М., Черепенин Г.В., Рыжов А.С. Моделирование системы сводов покрытия под воздействием смещений // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2019. № 1 (1). С. 15–25.
7. Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем. М.: Росреставрация, 1989. 164 с.
8. Беспалов В.В., Зимин С.С. Прочность каменной кладки сводчатых конструкций // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2016. № 11 (50). С. 37–51.
9. Зимин С.С., Кокоткова О.Д., Беспалов В.В. Сводчатые конструкции исторических зданий // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2015. № 2 (29). С. 57–72.
10. Левкин А.А. Напряженно-деформированное состояние оснований зданий при наличии разъединительного шпунтового ряда: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1996. 175 с.
11. Чиж И.Н. Оценка влияния шпунтового ограждения на напряженно-деформированное состояние основания существующей застройки: дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2014. 150 с.
12. Разводовский Д.Е., Шулятьев О.А., Никифорова Н.С. Оценка влияния нового строительства и мероприятия по защите существующих зданий и сооружений // *Российская архитектурно-строительная энциклопедия. Т. XII. Строительство подземных сооружений*. 2008. С. 230–239. URL: http://gosstroy-vniintpi.ru/RASE_12TOM.pdf (дата обращения: 13.12.2024).
13. Скибин Г.М., Чиж И.Н. Оценка оптимальной глубины погружения шпунта при взаимовлиянии соседних фундаментов // *Строительство и архитектура*. 2013. Т. 1. Вып. 1. С. 28–31.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГУРЕВИЧ Татьяна Михайловна – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой строительных конструкций, ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», 156530, Россия, Костромская область, пос. Караваево, Учебный городок, д. 34. E-mail: char1943@mail.ru

ПРИМАКИНА Елена Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», 156530, Россия, Костромская область, пос. Караваево, Учебный городок, д. 34. E-mail: ei-primakina@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Гуревич Т.М., Примакина Е.И. Оценка влияния восстанавливаемой части Ильинской церкви на существующие конструкции // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 1 (25). С. 11–24.

**ASSESSMENT OF THE IMPACT OF THE RESTORED PART
OF THE ELIJAH CHURCH ON EXISTING STRUCTURES**

T.M. Gurevich, E.I. Primakina

Kostroma State Agricultural Academy (Kostroma region, v. Karavaevo)

Abstract. This article presents the results of a study of the influence of the restored part of the religious building on existing structures. The results of calculations of several spatial models of the construction are presented. Conclusions were drawn on the feasibility of restoring the facility in accordance with the design solution.

Keywords: restoration, foundations, vaults, calculation models, settlements, stress.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

GUREVICH Tatiana Mikhailovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Building Structures, Kostroma State Agricultural Academy, 34, Uchebny Gorodok Street, Karavaevo settlement, Kostroma region, 156530, Russia. E-mail: char1943@mail.ru

PRIMAKINA Elena Ivanovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures, Kostroma State Agricultural Academy, 34, Uchebny Gorodok Street, Karavaevo settlement, Kostroma region, 156530, Russia. E-mail: ei-primakina@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Gurevich T.M., Primakina E.I. Assessment of the impact of the restored part of the Elijah church on existing structures // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 1 (25), pp. 11–24.

УДК 69.002.5

**ГОМОГЕНИЗАЦИЯ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИЕЙ***А.Г. Михайлов¹, И.И. Демченко², О.С. Игнатова²*¹ *Институт химии и химической технологии СО РАН (г. Красноярск)*² *ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск)*© Михайлов А.Г., Демченко И.И.,
Игнатова О.С., 2025

Аннотация. Предложен комплексный вибрационно-акустический метод гомогенизации дисперсных материалов на основе процесса дезинтеграции. Разработано теоретическое обоснование дезинтеграции акустической обработкой. Проведены лабораторные испытания дисперсного глинистого материала методом акустической дезинтеграции с определением основных параметров. Отмечено, что в основе метода заложен и реализован принцип обработки дисперсных материалов вибрационными и акустическими колебаниями. Установлено достижение полной гомогенности тонкодисперсного глинистого материала в период двухминутной обработки. Зафиксировано достижение как минимум 90 % гомогенности смеси разных классов крупности (класса бетонов) за тот же двухминутный период.

Ключевые слова: гомогенизация, смесь, лабораторный стенд, амплитуда, вибрационные, акустические колебания.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-25-33**ВВЕДЕНИЕ**

Полная гомогенизация смесей, особенно сложных по минеральному составу, крупности, удельному весу, поверхностным свойствам, является главной гарантией качества результата. Гомогенизация твердеющих смесей важна не только для равномерного распределения компонентов, но и для скорости приготовления. Широко применяют такие устройства приготовления строительных смесей, как механические смесители (типа одновальных бетоносмесителей) [1, 2]. Более эффективны, но реже используются вибросмесители (типа СмВ) [3] и двусосные смесители [4] (их применяют для гомогенизации сухих тонкодисперсных порошков). Тенденция развития производства сухих строительных смесей связана с недостатками растворных смесей, создающихся непосредственно на строительной площадке: последние имеют низкое качество из-за ошибок дозирования добавок, невысокого срока годности и т.д. Производство сухих строительных смесей практически полностью вытеснило приготовление смесей на строительных площадках. Главная особенность сухих строительных смесей состоит в том, что их создание возможно только на специальных заводах. В таком подходе есть преимущество только при развитой транспортной инфраструктуре. Если таковой нет, то отсутствие мобильных смесительных комплексов значительно снижает эффективность строительных работ в целом. Существенная проблема применения широко распространенных бетоносмесителей заключается в том, что не достигается полной гомогенностиготавливаемых смесей. Механическая подготовка смесей имеет поверхностное

воздействие на распределение частиц компонентов, что может не обеспечивать равномерное распределение тонкодисперсных частиц в объеме. Особенно сложно получить гомогенную массу при смешивании тонкодисперсных компонентов, имеющих тенденцию к слеживаемости. Разрушение агрегатов при механической обработке практически невозможно. Необходим метод, позволяющий осуществлять разрушение, дезинтеграцию агрегатов слежавшихся компонентов в процессе гомогенизации. К числу известных методов, способных обеспечить данную процедуру, а также подготовку материала к стадии гомогенизации, относится акустический [5]. Акустическая обработка входит в число способов дезинтеграции тонкодисперсных материалов в инфразвуковом и звуковом диапазонах. Данный способ является более предпочтительным, так как воздействие оказывается за счет акустических волн, распространяющихся по всему объему с низким коэффициентом затухания [6]. Это позволяет разрушать межмолекулярные связи одновременно, в том числе и в области внутри самих агрегатов. Каждая волна при прохождении по обводненной структуре ведет к разрушению всех межчастичных связей. Внутри глинистых агрегатов на глубину полного затухания волн волновые колебания «раскачивают» частицы в структуре агрегата, разрывая их связи. Следует учитывать, что поверхность частиц смеси является гидрофильной. В силу потенциально высокой тиксотропности таких частиц при высокой дисперсности после снятия волновой нагрузки связи восстанавливаются с той же скоростью, с которой были разрушены [7]. Только при наличии доступа дополнительной свободной воды к области освобожденных частиц разорванные межчастичные связи будут замыкаться на данную воду. В этом случае происходит полная дезинтеграция агрегатов материала [8], что обуславливает высокодинамичное достижение гомогенности смеси. Акустический метод дезинтеграции материала наиболее перспективен для процесса гомогенизации по причине высокой скорости, необходимой для обеспечения требуемой технологичности процесса в автоматизированных системах строительного процесса. Основным недостатком способа можно считать лишь отсутствие практического использования в промышленных масштабах при подготовке гомогенных смесей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ

Был разработан и изготовлен лабораторный стенд, работающий по принципу возбуждения вибрационно-акустических колебаний низкочастотного диапазона [9]. По конструкции эта установка (рис. 1) предназначена для акустической обработки тонкодисперсного материала как в цикличном, так и в поточном режимах. Общие характеристики установки представлены в табл. 1. Лабораторный ударно-акустический стенд оборудован измерительными приборами (амперметром, электронным вольтметром, тонометром и тахометром) для снятия показаний во время процесса дезинтеграции. Над источником вибрационно-акустических колебаний установлена рабочая камера с эластичным дном для герметичной изоляции области обработки от механического источника и для передачи вибрационных и акустических импульсов в область рабочей камеры. Рабочая камера оборудована местом для загрузки материала, в противоположном конце – разгрузочным люком. Для работы в поточном режиме область выгрузки материала оборудована сифонной подачей пульпы с направляющим лотком, выводящим материал за пределы установки.

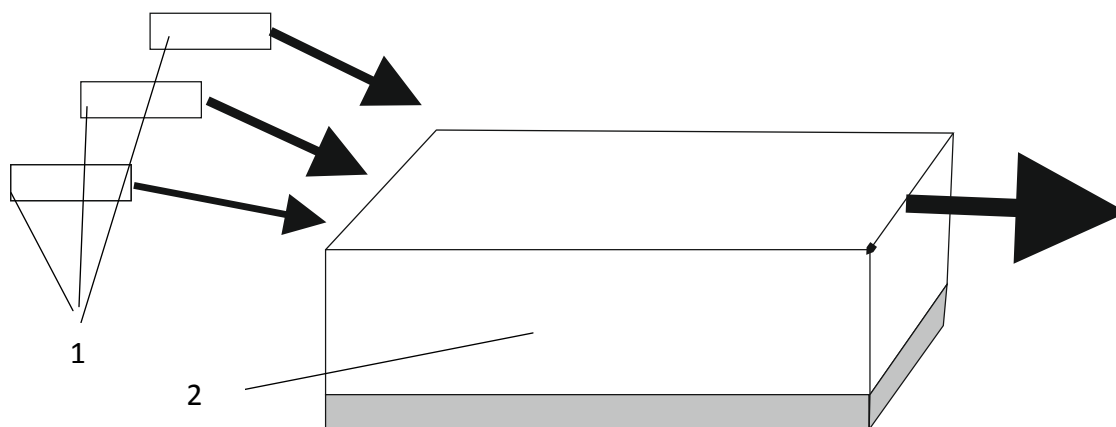


Рис. 1. Схема лабораторного ударно-акустического гомогенизатора:
1 – дозаторы компонентов; 2 – рабочая камера вибрационно-акустического стенда

Таблица 1

Параметры лабораторной ударно-акустической установки

Параметры	Единицы измерения	Значение
Производительность	м ³ /ч	0,025–0,1
Частота колебаний	Гц	10–100
Амплитуда колебаний	мм	5–40
Расход воды	м ³ /м ³	4,0–0,5
Крупность исходного материала	мм	≤ 5
Потребляемая мощность	кВт	0,3–1,5
Масса	кг	60

Основой установки является источник акустических колебаний. Он представляет собой набор пластин из пружинной стали, установленных в одной плоскости и закрепленных торцами на поворотных валах. Поворотные валы соединены через эксцентриситет с центральным валом посредством кривошипно-шатунного механизма, а центральный вал – с электродвигателем постоянного тока через ременную передачу. Весь источник установлен на жесткой раме, выполненной из швеллеров. На раме также закреплен и двигатель.

Механизм работы источника колебаний заключается в следующем. Крутящий момент от электродвигателя через ременную передачу передается на центральный вал. Центральный вал через кривошипно-шатунный механизм поворачивает боковые поворотные валы, расположенные на противоположных сторонах под рабочей камерой гомогенизатора, одновременно и синхронно в разные стороны на определенный угол, задаваемый эксцентриситетом.

За счет высокой скорости колебаний пластин, превышающей скорость распространения звука в водной среде, формируются акустические волны. В связи с этим источник гомогенизатора позволяет проводить обработку материала как ударными волнами, так и «медленными» колебаниями. Для реализации формирования разных видов волновых колебаний предусмотрено два вида торцевого крепления упругих пластин в поворотных валах. При формировании «медленных» колебаний торцевые концы пластин устанавливаются на боковых поворотных валах выше их центральных осей. При работе встречный синхронный поворот боковых валов позволяет сжать упругие пластины, формируя их изгиб с образованием заданной амплитуды. Размер задаваемой амплитуды определяется геометрической зависимостью между хордой и длиной дуги:

$$a = \sqrt{3 \frac{l^2 - m^2}{16}},$$

где a – амплитуда; l – длина дуги; m – длина хорды.

Для формирования ударных волн торцы упругих пластин закреплены в плоскости осей боковых поворотных валов. Упругие пластины при этом крепятся таким образом, что в исходном положении они находятся в выведенном из равновесия состоянии за счет предварительного осевого сжатия. При повороте боковых валов они одновременно поворачивают пластины через их жесткое торцевое крепление на угол, превышающий среднее положение их неустойчивого равновесия. После прохождения пластинами средней линии они резко прогибаются. Если в исходном состоянии пластины занимают выпуклое положение, то после прогиба они займут выгнутое. При этом сам момент прогиба (прищелкивание) осуществляется с высоким ускорением, достигающим на пластинах толщиной 4 мм значения $250 \text{ м}^2/\text{с}$. Прогиб с прищелкиванием сопровождается генерированием волнового импульса высокого давления в окружающую водную среду. Низкая инерционность механической системы ударно-акустического источника позволяет генерировать низкочастотные колебания пластин в диапазоне 18–23 Гц со скоростями в моменты прищелкивания, достаточными для формирования в водной среде ударных волн. За счет высоких амплитудных колебаний источника формируется «виброкипящий» режим перемешивания в рабочей камере. Скорость гомогенизации материала возможна при наличии между частицами дополнительной воды, что обеспечивается интенсивным «виброкипящим» режимом. Для доступа свободной воды к поверхностям дисперсных частиц необходимым условием является взвешенное состояние даже слежавшихся агрегатов. Лабораторный стенд гомогенизации позволяет менять амплитудно-частотные параметры. Подбор необходимой амплитуды проводится на основании зависимости величины изгиба пластины от ее осевого сжатия (рис. 2). Амплитуда колебаний более 10 мм при низких частотах обеспечивает такие условия. Поскольку каждое колебательное движение пластин завершается ускорением (прищелкиванием), обеспечивающим достаточный импульс для формирования волнового колебания вплоть до ударной волны в пульпе, это достаточно значимо поддерживает и даже усиливает взвешенное состояние твердых частиц и их агрегатов в водной среде.

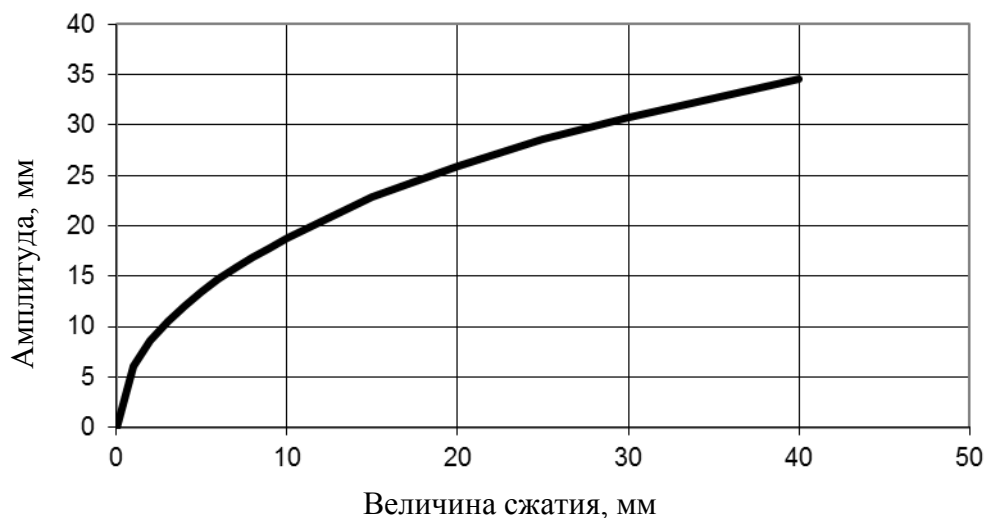


Рис. 2. Влияние величины осевого сжатия на амплитуду

Акустическое поле в тонкодисперсном материале с естественной влажностью (например, влажностью $\sim 35\%$) в начальный период приводит его в состояние тиксотропного разжижения, сопровождающегося псевдотекучестью массы с частичным выделением связанной воды на поверхность. Визуально наблюдают следующее: в начальный период обработки идет стадия разрыва связей, частицы приобретают относительную подвижность. Слежавшиеся агрегаты материала естественной влажности приобретают свойство натуральной текучести и теряют свою первоначальную форму. Смежные разрозненные куски агрегатов объединяются в массу и равномерно растекаются по объему рабочей камеры. В момент снятия акустического поля без добавления дополнительной воды смешиваемый тонкодисперсный материал (в силу своих тиксотропных свойств) сразу же (мгновенно) восстанавливает нарушенные связи и получает прежние свойства [8], т.е. приобретает агрегатную структуру. Достичь полной гомогенизации можно и без добавления «лишней» свободной воды, если в начальный момент процесса добавлено расчетное количество воды, однако только при условии наличия акустического поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные в широком диапазоне управляемых параметров эксперименты свидетельствуют о том, что гомогенное состояние может быть надежно обеспечено при добавлении воды до достижения значения естественной влажности при конкретной размерности дисперсного материала. Стадия «виброкипящего» состояния предваряет состояние максимального разрыхления смеси, в том числе слежавшихся агрегатов. В процессе обработки мелкораздробленные газовые пузырьки преимущественно локализуются в нижних слоях после первых 30 с акустической обработки. Вслед за этим состоянием происходит взрывообразное «разлетание» частиц по всему обрабатываемому объему пульпы, устанавливается «виброкипящий» режим перемешивания в рабочей камере. В этот период обработки у частиц полностью отсутствуют структурные связи, поэтому частицы хаотично перемещаются внутри обрабатываемого объема рабочей камеры. Достичь этого можно только при добавлении свободной воды в процесс в размере не менее величины естественной влажности. Для процесса безвозвратной дезинтеграции

до состояния свободного текучего состояния немаловажным условием является добавление свободной воды, превышающее как минимум 0,5 объема твердого состояния (с учетом естественной влажности). Такое состояние может быть обеспечено при условии замыкания у частиц всех поверхностных связей на свободную воду. Теоретический расчет необходимого количества дополнительной воды приведен на рис. 3.

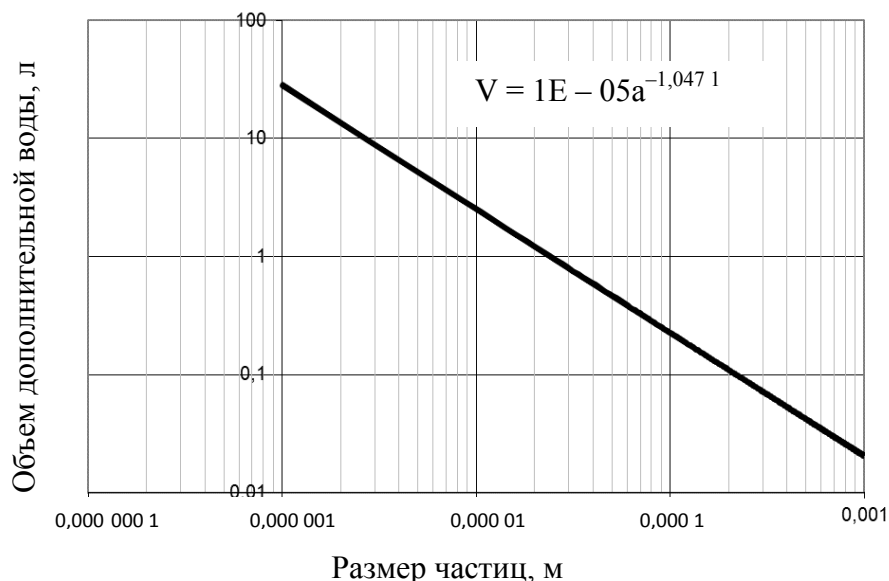


Рис. 3. Зависимость объема добавленной воды от размера частиц

Экспериментально на лабораторной установке проводили исследования гомогенизации в водной среде двухкомпонентного и трехкомпонентного материала в условиях разных управляемых амплитудно-частотных параметров. Расчетное теоретическое значение необходимого объема дополнительной воды не может обусловить надежное достижение абсолютной гомогенизации в силу высокой неоднородности и хаотичного перемещения частиц при «виброкипящем» состоянии, но обуславливает возможность сохранности дезинтегрированного состояния после снятия акустической нагрузки. При снятии акустического воздействия часть смежных поверхностей частиц может находиться в пределах рыхлосвязанного или даже прочносвязанного слоя водной оболочки. Важно, что значение необходимой дополнительной воды следует получать в ходе экспериментальных исследований для определенного обрабатываемого материала. Для конкретных составов смесей следует подбирать соотношение с водой на основе средней крупности частиц смеси по зависимости, представленной на рис. 3. В качестве компонентов для двухкомпонентной смеси были использованы материалы по соотношению 1 : 1 агрегатированной каолиновой глины естественной влажности (37 %) с размером частиц 5–10 мкм и объемным весом $2,23 \text{ г/см}^3$, а также сухого кварцевого песка с размером частиц 0,8–1,2 мм и объемным весом $1,54 \text{ г/см}^3$. В ходе экспериментов по гомогенизации трехкомпонентной смеси смешивали в равных объемах материал агрегатированной каолиновой глины, кварцевый песок и дробленый магнетит (железная руда) узкого класса крупности (0,5–1,0 мм) с объемным весом $4,12 \text{ г/см}^3$. К двухкомпонентной и трехкомпонентной смеси добавляли воду в объеме 1 : 1.

Оценка полного процесса гомогенизации была получена в результате экспериментальных исследований. Эксперименты проводили на лабораторной ударно-акустической установке. При обработке использовали образцы только однородного минералогического состава естественной влажности. Поскольку скорость процесса дезинтеграции высокая и зависит от уровня интенсивности излучения, оценку степени дезинтеграции проводили через каждые 30 с.

Результат полноты гомогенизации определяли взвешиванием 1 см³ образца полученной смеси, взятого сразу после прекращения обработки. Отклонение веса полученного образца от расчетного значения как в сторону превышения, так и в сторону снижения фиксировалось в процентах. Данные экспериментального изучения параметров дезинтеграции наиболее распространенных природных типов глин приведены в табл. 2. Результаты весьма убедительно показывают преимущества предлагаемого метода гомогенизации. Так, абсолютная гомогенизация смеси проходит ряд стадий: от прочно-связанного состояния связей между частицами в агрегатах до полного смачивания всех поверхностей частиц свободной водой. Акустическая обработка кратно интенсифицирует кинетику процесса смешивания.

Таблица 2

Эффективность гомогенизации

№ п/п	Показатели			
	Частота, Гц	Амплитуда, мм	Время обработки, с	Степень гомогенизации, %
Двухкомпонентная смесь				
1	15	5	30	19,36
2	30	5	60	61,06
3	15	5	120	77,86
4	30	10	30	48,56
5	15	10	60	55,36
6	20	10	120	98,84
7	15	15	30	32,86
8	40	15	60	99,67
9	15	15	90	91,36
10	30	15	120	99,81
Трехкомпонентная смесь				
11	15	5	30	22,26
12	30	5	75	73,70
13	15	5	90	91,26
14	30	10	30	43,66
15	40	10	75	95,36
16	20	10	120	100,0
17	15	15	30	37,95
18	40	15	75	98,60
19	15	15	120	100,0
20	30	15	120	100,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате лабораторных исследований в области гомогенизации разных компонентных смесей было установлено, что при ударно-волновом воздействии происходит интенсивное смешивание, кратно превосходящее механическое. Было отмечено, что первоначальной фазой является тиксотропное разжижение в водной среде, а затем следует виброкипящее состояние, где происходит разрушение связей между частицами в агрегатах. Эффективность процесса гомогенизации в ударно-волновой установке зависит от отношения твердого к жидкому, от интенсивности волновой и вибрационной нагрузки, времени обработки. Минимальное отношение твердого к жидкому в материале (добавление воды) следует оценивать на основе крупности смешиваемого материала. Было экспериментально обосновано влияние амплитудно-частотной характеристики и времени воздействия на эффективность дезинтеграции, а также установлено, что в течение первой минуты обработки может быть достигнута практически полная гомогенизация смеси (даже с применением в качестве компонента слежавшихся агрегатов). Экспериментальные исследования подтвердили возможность применения ударно-волнового принципа приготовления гомогенных смесей, что может способствовать развитию направления использования мобильных гомогенизаторов.

Исследование выполнено при поддержке проекта № FWES-2021-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потапова Е.Н. Технология сухих строительных смесей. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 376 с.
2. Ревич Я.Л., Рудомин Е.Н., Мажайский Ю.А., Стаценко А.С., Основина Л.Г., Мальцев Н.В., Основин С.В. Технология строительного производства. М.: Ассоциация строительных вузов, 2011. 376 с.
3. Корнеев В.И., Зозуля П.В., Медведева И.Н., Богоявленская Г.А., Нуждина Н.И., Брыков А.С. Технология сухих строительных смесей. М.: Лань, 2024. 372 с.
4. Баженов Ю.М., Коровяков В.Ф., Денисов Г.А. Технология сухих строительных смесей. М.: АСВ, 2015. 112 с.
5. Горная энциклопедия: в 5 т. М.: Советская энциклопедия, 1986. Т. 2. 575 с.
6. Хрунина Н.П. Создание систем дезинтеграции глинистых песков и их гидросмесей на основе дополнительного звукового воздействия // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. № 4. С. 197–202.
7. Урьев Н.Б., Иванов Я.П. Структурообразование и реология неорганических дисперсных систем и материалов. М.: Химия, 1991. 210 с.
8. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология. М.: Недра, 1996. 423 с.
9. Патент РФ 20151544437. *Дезинтеграционное устройство* / Михайлов А.Г., Грищенко А.Н., Мачнев Ю.И., Соколов С.Н., Довбаш В.В. Заявл. 17.12.2015. Оpubл. 02.07.2018, Бюл. № 19.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МИХАЙЛОВ Александр Геннадьевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт химии и химической технологии СО РАН, 660036, Россия, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 24. E-mail: mag@icct.ru

ДЕМЧЕНКО Игорь Иванович – доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: ademchenko@sfu-kras.ru

ИГНАТОВА Ольга Сергеевна – кандидат технических наук, доцент ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: OIgnatova@sfu-kras.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Михайлов А.Г., Демченко И.И., Игнатова О.С. Гомогенизация дисперсных материалов виброакустической дезинтеграцией // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 1 (25). С. 25–33.

HOMOGENIZATION OF DISPERSED MATERIALS BY VIBRO-ACOUSTIC DISINTEGRATION

A.G. Mikhailov¹, I.I. Demchenko², O.S. Ignatova²,

¹ Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS (Krasnoyarsk)

² FGAOU VO «Siberian Federal University» (Krasnoyarsk)

Abstract. A complex vibration-acoustic method of homogenization of dispersed materials based on the disintegration process is proposed. Theoretical substantiation of disintegration by acoustic treatment is developed. Laboratory tests of dispersed clay material by the method of acoustic disintegration with determination of the main parameters have been carried out. It is noted that the method is based on the principle of processing of dispersed materials by vibration and acoustic vibrations. The achievement of complete homogeneity of fine dispersed clay material during the period of two-minute treatment was established. Achievement of at least 90% homogeneity of the mixture of different size classes (class of concrete) during the same two-minute period is fixed.

Keywords: disintegration, clay, laboratory installation, vibration, acoustic, oscillation.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

MIKHAILOV Alexander Gennadievich – Doctor of Technical Sciences, Chief Scientific Associate, Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS, 50, building 24, Akademgorodok St., Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: mag@icct.ru

DEMCHENKO Igor Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave, Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: ademchenko@sfu-kras.ru

IGNATOVA Olga Sergeevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave, Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: OIgnatova@sfu-kras.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Mikhailov A.G., Demchenko I.I., Ignatova O.S. Homogenization of dispersed materials by vibro-acoustic disintegration // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 1 (25), pp. 25–33.

УДК 681.532.32

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ РАСХОДОМ
ЗЕРНИСТЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ***А.А. Пешехонов¹, И.В. Рудакова¹, А.В. Черникова², С.Н. Кузьмина³**¹«Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)» (г. Санкт-Петербург)**²«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
(г. Санкт-Петербург)**³Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина) (г. Санкт-Петербург)*

© Пешехонов А.А., Рудакова И.В.,
Черникова А.В., Кузьмина С.Н., 2025

Аннотация. Рассмотрены автоматические системы с объемным управлением расходом сыпучих материалов. Для определенной области гранулометрического состава и плотности частиц показано преимущество пневматических питателей перед системами с механическим воздействием на сыпучие материалы. Для минимизации энергетических затрат управление расходом сыпучего материала предложено реализовать в виде импульсов с переменной скважностью, амплитуда которых обеспечивает минимальные удельные энергозатраты на расход воздуха. Энергосберегающее управление расходом зернистых сыпучих материалов является важной задачей в различных отраслях, таких как сельское хозяйство, пищевая промышленность, строительство и др. Эффективное управление расходом подобных материалов может способствовать существенному снижению затрат и уменьшению негативного воздействия на окружающую среду. Отмечено, что ключевыми аспектами, исследование которых может быть полезно в этой области, выступают оптимизация процессов, мониторинг и анализ данных, энергоэффективные технологии, управление запасами, обучение персонала, использование альтернативных источников энергии, снижение отходов. Сделан вывод, что данные меры могут помочь не только при снижении затрат, но и при повышении устойчивости бизнеса в условиях меняющегося рынка, а также при обеспечении выполнения экологических требований.

Ключевые слова: зернистые сыпучие материалы, объемное управление расходом, импульсное управление, минимум энергетических затрат.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-34-43**ВВЕДЕНИЕ**

В ряде технологических процессов химической, металлургической, фармацевтической, пищевой отраслей промышленности, в производстве удобрений и строительных материалов используются потоки зернистых сыпучих материалов (ЗСМ). Их применяют в технологиях растворения, сушки, смешивания, при транспортировании, дозировании, в каталитических процессах и ряде других. Чтобы увеличить поверхность контакта фаз, частицы сыпучих материалов перед подачей в технологические аппараты обычно измельчают, но до определенной степени, так как энергетические затраты на измельчение и склонность к агломерации, налипанию на внутренние поверхности аппаратов веществ,

измельченных до уровня порошков, могут аннулировать эффект от увеличения площади контакта. В связи с этим большинство компонентов с твердой фазой, участвующих в различных технологических процессах, следует отнести к ЗСМ. Для транспортирования, дозирования и управления расходом ЗСМ применяют различного рода питающие системы, в составе которых практически всегда можно выделить рабочий орган (РО), непосредственно взаимодействующий с материалом, привод – исполнительный механизм (ИМ), а также устройства контроля и/или управления ими. Рабочий орган и ИМ в совокупности составляют исполнительное устройство (ИУ). Классификация ИУ для ЗСМ выполняется обычно по типу ИМ и по принципу работы РО. В настоящей работе авторами предложено классифицировать ИУ для ЗСМ по источнику силы, перемещающей массивы твердых частиц, на основе выделения ИУ с гравитационным, механическим, вибрационным, аэрационным и пневматическим типами воздействия. В этой классификации требуется пояснить следующее:

1) вибрационные питатели рассматриваются отдельно от механических, поскольку РО в них перемещается возвратно-поступательно с высокой частотой и на расстояние, которое на несколько порядков меньше, чем у механических. Кроме того, при вибрационном воздействии в ЗСМ наблюдаются специфические эффекты: изменение насыпной плотности, расслоение по крупности и прочее, что не наблюдается при использовании ИУ с другими принципами действия;

2) в аэрационных питателях (аэрожелобах, аэрокамерах) при подаче воздуха в материал снизу через аэроднище сухое трение между частицами сменяется вязким, и материал начинает «течь», но не под давлением воздуха, а под действием составляющей силы тяжести, так что аэрационные питатели следует отнести к группе гравитационных.

Традиционно применяемые механические ИУ имеют ряд недостатков, связанных с принципом перемещения материала:

1) присутствуют кинематические пары – подшипниковые узлы, тяги, шарниры, шнеки, лопастные колеса, в которых между деталями есть зазоры, достаточные для проникновения в них мелкой фракции материала, что может привести к изменению расходных характеристик, а в результате – к заклиниванию или разрушению РО;

2) механические РО не удастся сделать полностью герметичными, вследствие чего мелкая фракция ЗСМ попадает в окружающую среду, что приводит к нарушениям требований экологической безопасности;

3) в силу наличия зазоров в соединениях элементов механических РО имеет место проникновение внутрь влажного воздуха из окружающей среды, что оказывает негативное воздействие на свойства ЗСМ;

4) ИУ с вибрационными приводами имеют существенную металлоемкость, сложную конструкцию, а также высокую частоту перемещения механических элементов, что снижает надежность их функционирования.

Существенные преимущества в части надежности, экологической и технической безопасности, если сравнивать с механическими и вибрационными ИУ, дают питатели и дозаторы с пневматическим побуждением расхода ЗСМ, в которых перемещение частиц происходит под давлением сжатого воздуха. Целями настоящей работы являются исследование характеристик бесклапанных пневматических ИУ для управления расходом ЗСМ и разработка методики расчета режимов их работы, обеспечивающих минимизацию энергетических затрат.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматриваемые в данной работе системы входят в линейку многофункциональных пневматических преобразователей (МФПП) [1, 2], применяемых для контроля и управления параметрами ЗСМ. К этим параметрам относятся объемный расход, количество, гранулометрический состав, плотность и влагосодержание частиц материала. В настоящее время линейка МФПП содержит более 10 вариантов исполнительных и 5 вариантов измерительных систем, различия между которыми заключаются в реализуемых способах использования входной и выходной информации, а также в специальных технических и конструктивных решениях. На пять способов осуществления функций контроля и управления в МФПП получены патенты Российской Федерации.

В общем случае каждый МФПП содержит три основных элемента (рис. 1):

РО – это смесительная камера (СК) с подключенными к ней загрузочным материалопроводом (ЗМП), воздухопроводом (ВВ) для подачи или отбора воздуха, выпускным стволом (ВС) для вывода двухфазной смеси «газ – сыпучий материал»;

ИМ – блок генерации расхода газа;

систему контроля и управления.

Входным параметром для системы контроля и управления служит величина давления в СК на входе в ВС ($P_{СК}$ на рис. 1). После выхода из ВС смесь разделяется на газовую и твердую фазы. Последняя с массовым расходом F_M поступает в технологический объект, а газ направляется в аспирационную систему. В качестве побудителя расхода воздуха может применяться индивидуальный воздухоудувный агрегат или дросселирующий элемент в сети пневмопитания.

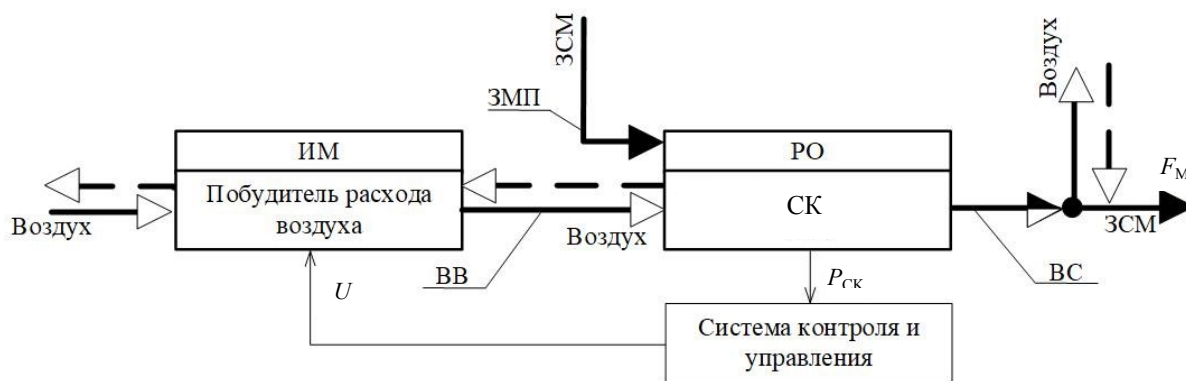


Рис. 1. Обобщенная структура МФПП: U – управление;
 $P_{СК}$ – давление в смесительной камере; F_M – выходной расход материала

Давление в СК зависит от параметров переносимого материала: его количества и расхода, размера, плотности и влажности твердых частиц. Оценкой этих параметров являются результаты работы системы контроля.

К преимуществам использования локальных систем пневматического контроля и управления на основе схемы МФПП следует отнести:

1) отсутствие в РО подвижных элементов (кинематических пар), вследствие чего повышается функциональная надежность, увеличивается срок службы, а также снижаются затраты на техническое обслуживание;

2) герметичность трассы перемещения двухфазной смеси, что позволяет обеспечивать требования к экологической безопасности, а также изолировать материал от воздействия параметров окружающей среды;

3) конструкция предлагаемых МФПП позволяет разнести в пространстве ИМ и РО, благодаря чему воздухоудувный агрегат может быть установлен за пределами производственной зоны потенциально опасного объекта.

На рис. 2 представлены структурные схемы двух основных исполнительных систем линейки МФПП: напорного вертикального пневматического питателя (ВПП) непрерывного действия и вакуумно-напорного дискретного дозатора с частотно-импульсным управлением расходом. Определение характеристик этих систем является предметом исследования в настоящей работе.

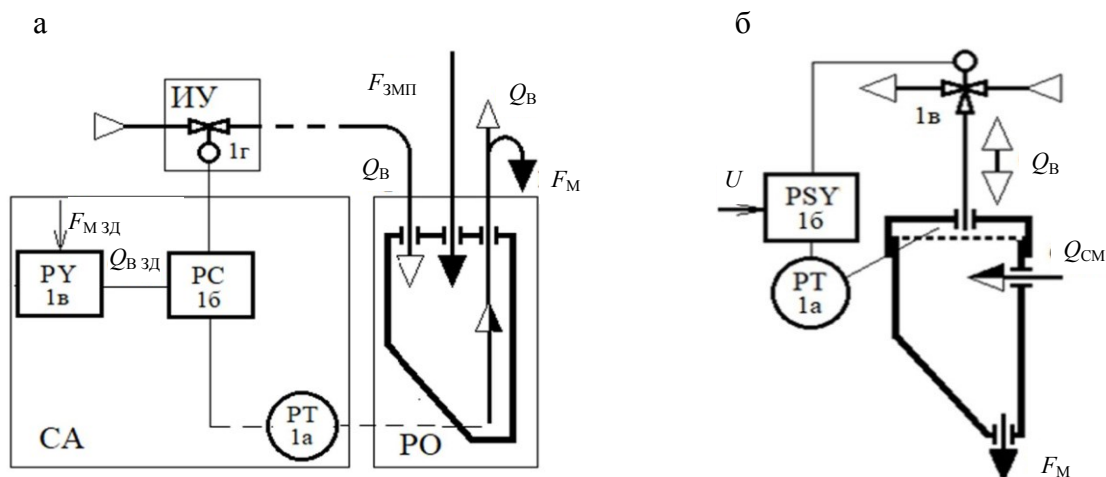


Рис. 2. Структурные схемы исполнительных систем на основе МФПП:
а – вертикальный пневматический питатель; б – вакуумно-напорный дозатор

Заполнение СК ВПП частицами ЗСМ происходит непрерывным потоком $F_{змп}$ по мере ее опорожнения вследствие уноса материала через выпускной ствол. Выходной расход материала F_m зависит от расхода поступающего в СК воздуха Q_v . Физическая реализация управления осуществляется с помощью ИУ (см. рис. 2а (поз. 1г)) на линии подачи воздуха. При постоянной величине воздуха (Q_v), подаваемого в течение различных промежутков времени, ВПП может осуществлять широтно-импульсную (ШИМ) или релейно-импульсную (РИМ) модуляцию расхода материала на выходе F_m .

При условии, что давление в СК при выдаче материала больше, чем давление столба насыщенного воздухом материала в ЗМП, заполнение СК начинается только после полного опорожнения СК. В этом случае выдача материала происходит в виде порций (доз) постоянного объема, а управление средним во времени расходом может осуществляться путем изменения частоты выдачи этих доз.

Вакуумно-напорный дозатор ЗСМ загружается при подключении к СК через трехходовой кран (см. рис. 2б (поз. 1в)) линии всасывания вакуумного вентилятора. Из расходной емкости (на рис. 2б не показана) под действием внешнего (в частности, атмосферного) давления ЗСМ заполняет СК вплоть до расположенной в ее верхней части решетки, задерживающей материал. При перекрытии частицами материала отверстий

решетки в камере над ней происходит скачок разрежения, фиксируемый мановакуумметрическим датчиком (см. рис. 2б, поз. 1а). Выходной сигнал этого датчика поступает в блок релейного управления (поз. 1б), в результате чего выполняется переключение трехходового крана (см. рис. 2б, поз. 1в) в положение, при котором избыточное давление с выходного коллектора вентилятора создает обратный поток воздуха через решетку в СК, активизируя ее опорожнение.

Основным недостатком систем пневматического побуждения расхода сыпучих материалов являются существенные энергетические затраты на расход воздуха. В наибольшей степени это присуще двухфазным потокам с управляемой подачей частиц твердой фазы, в которых объемная концентрация таких частиц обычно не превышает 5 % [3]. Задача снижения энергозатрат обычно решается путем конструктивных изменений, выполняемых с целью снижения аэродинамического сопротивления трассы [4]. Экспериментальные исследования характеристик базовых систем МФПП направлены на решение указанной задачи путем изменения режима подачи и формы управляющего воздействия.

Эксперименты проводились на лабораторной установке с верхним пределом диапазона расхода 400 кг/ч по твердой фазе. В качестве последней использовались гранулы органических веществ и полимеров с определяющими размерами от $2 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ м с плотностью материала $1\,000 \pm 250$ кг/м³. Цель эксперимента заключалась в определении расходной характеристики ВПП по твердой фазе. Подача воздуха осуществлялась центробежным вентилятором. Воздух подавался непосредственно в массу содержащегося в СК материала. Его расход изменялся дросселем на выходе вентилятора. Для контроля величины давления в СК применялся датчик низкого давления БД-1-И с диапазоном 0–10 кПа, расход несущего воздуха определялся по показаниям расходомера ЭМИС-МЕТА-215-025-Г с диапазоном 0,000 08–0,008 м³/с. Оба датчика имеют линейную статическую характеристику и аналоговый токовый выходной сигнал. Температура воздуха контролировалась термометром расширения ТТЖ-М исп. 1П4 с диапазоном 0–100 °С. Весовой расход материала F_M оценивался интегральным методом по весу W_M и длительности Δt выдачи дозы в соответствии с формулой $F_M = W_M / \Delta t$, кг/с. Для взвешивания дозы применялись тензометрические весы с приведенной погрешностью $5 \cdot 10^{-4}$ кг и электронный секундомер. Для анализа динамических характеристик ВПП выходные сигналы датчиков были собраны через 14-разрядный аналого-цифровой преобразователь на микропроцессорный контроллер ОВЕН 160 и выведены в форме трендов на компьютер.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты экспериментов подтвердили теоретические предположения о возможности использования настройки режимных параметров выдачи материала с целью сокращения удельных затрат воздуха на его перемещение.

На рис. 3 в качестве примера приведены результаты экспериментов с материалом следующих свойств: гранулы органического вещества, по форме близкие к сферическим; определяющий диаметр $(2 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$ м; плотность $\rho_M = 1\,150$ кг/м³. Представлены статические зависимости параметров двухфазного потока «воздух – ЗСМ» на выходе ВПП при различных расходах несущего воздуха (рис. 3а). Функция 1 на рис. 3а построена в соответствии с регрессионным уравнением третьего порядка, аппроксимирующим расходную характеристику ВПП – зависимость массового расхода твердой фазы от

объемного расхода воздуха $F_M = f(Q_B)$. Аналогичные по характеру изменения параметров F_M и Q_B зависимости получены при исследовании двухфазного потока на загрузке вакуумно-напорного дискретного дозатора. Функция 2 на рис. 3а ($f(Q_B) = 0,1F_B / F_M$) свидетельствует о наличии минимума удельных затрат воздуха на перемещение материала при значении, равном $Q_{B \text{ опт}}$.

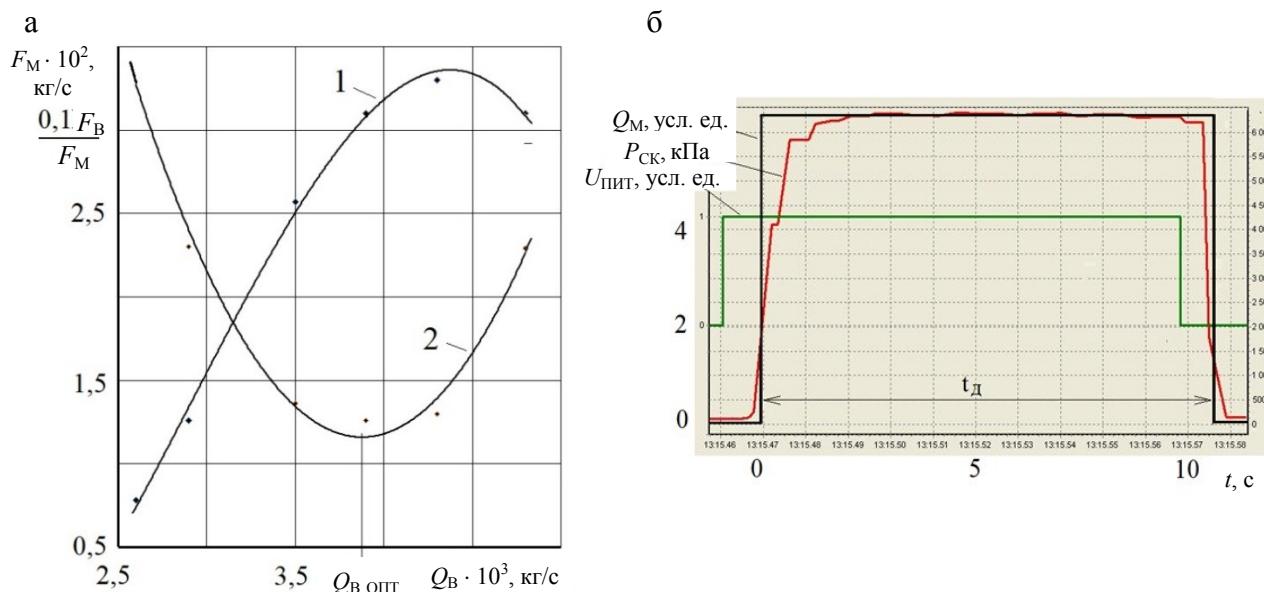


Рис. 3. Экспериментальные характеристики ВПП
в режиме непрерывного управления расходом:

а – статические; б – динамические; Q_m – объемный расход твердой фазы;
 $P_{СК}$ – давление в СК; $U_{пит}$ – напряжение питания привода вентилятора

На рис. 3б представлена переходная характеристика ВПП по величине давления в СК с выходом на максимальное значение расхода материала. Из графика видно, что время нарастания давления $P_{СК}$ в СК до момента начала установившегося движения двухфазной смеси (1,5 кПа) и время переходного процесса до выхода давления на установившееся значение (единицы секунд) в совокупности минимум на порядок меньше, чем длительность выдачи материала (десятки секунд и более). Аналогичный вывод можно сделать относительно времени прекращения выдачи материала. Поскольку давление на входе в выпускной ствол коррелировано с расходом двухфазного потока через него, предлагается динамику изменения расхода твердой фазы аппроксимировать прямоугольным импульсом. С целью минимизации затрат электроэнергии на обеспечение требуемого расхода воздуха можно использовать систему импульсного управления расходом. При моделировании подача воздуха аппроксимируется последовательностью прямоугольных импульсов с широтно-импульсной (ШИМ), релейно-импульсной или частотно-импульсной (ЧИМ) модуляциями, причем мгновенная амплитуда импульса расхода $Q_{m \text{ мн}} = \text{const}$ должна соответствовать координате минимума относительных затрат воздуха (см. рис. 3а). При этом систему управления расходом ЗСМ с ШИМ можно рассматривать как дискретный питатель, а систему с ЧИМ – как частотно-импульсный

дозатор. Такой режим реализуется при условии, что в СК давление $P_{СК}$ больше, чем давление $P_{ЗМП}$ столба, насыщенного воздухом материала в ЗМП.

Управление расходом с применением ШИМ осуществляется путем изменения длительности выдачи материала t_d при постоянном периоде прерывания ($T_{и} = \text{const}$).

В режиме с ЧИМ на промежутке времени одного периода прерывания $T_{и} = \text{var}$ осуществляются набор и выдача единичной дозы. Управляющим параметром служит частота следования импульсов при постоянных величинах t_d и $Q_{ММН}$, т.е. выдача материала происходит дозами постоянного объема, который в общем случае выражается как

$$V_0 = \int_{t_1}^{t_2} Q_{ММН}(t) \cdot dt, \quad (1)$$

где $t_2 - t_1 = t_d$ – длительность выдачи дозы.

При аппроксимации динамики выдачи материала прямоугольным импульсом уравнение (1) принимает вид

$$V_0 = Q_{ММН} \cdot t_d. \quad (2)$$

Если величина V_0 не задана из соображений технологии, то определение параметров импульсной последовательности в случае управления с ЧИМ требует специального рассмотрения.

Средний объемный расход материала можно определить как

$$Q_{МСР} = V_0 \cdot f = V_0 \cdot T_{и}^{-1}. \quad (3)$$

где $V_0 = \text{const}$ – объем единичной дозы; $f = \text{var}$ – частота выдачи доз, служащая параметром управления расходом; $T_{и}$ – переменный период следования импульсов.

Учитывая обратную зависимость, связывающую частоту и период следования импульсов, и используя уравнение (2), запишем выражение (3) для максимальной величины среднего расхода материала:

$$Q_{ММН}^{\text{max}} = \frac{Q_{ММН} \cdot t_d}{t_d + \Delta t}, \quad (4)$$

где Δt – минимальный промежуток времени между последовательными импульсами, необходимый для набора дозы в СК и срабатывания технических средств системы автоматического регулирования.

Производительность по среднему расходу в системах с ЧИМ ограничена необходимостью использовать значительную часть минимального периода выдачи доз на заполнение СК. Повысить величину максимально достижимого среднего расхода материала при сохранении минимального удельного расхода воздуха предлагается путем применения сдвоенной конструкции дозатора (например, на основе ВПП). На рис. 4а такая конструкция показана в виде схемы из двух дозаторов I и II, оборудованных аэроднищами, через которые в СК подается воздух. Материал поочередно выдается в приемный желоб III. Давление в СК I и II измеряется датчиками избыточного давления (рис. 4 (поз. 1а и 1б)). Их выходные сигналы поступают на контроллер (поз. 1в), в алгоритм работы которого заложена логическая схема управления клапанами (поз. 1г, 1д и 1е). Циклограмма работы сдвоенного дозатора в режиме максимальной производительности по расходу материала показана на рис. 4б. Промежуток времени между двумя последовательными выдачами доз сокращен до минимума, и в него входит время срабатывания технических средств автоматизации, а также определенная величина запаса по времени, исключающая возможность возникновения конфликтных ситуаций с наложением алгоритмов выдачи доз.

Таким образом, величина Δt априори известна. Поскольку величина $Q_{\text{мн}}$ определена из условия минимума энергетических затрат, решение уравнения (4) дает возможность определить длительность выдачи дозы t_d и сформировать временные параметры алгоритма управления расходом в режиме минимальных энергозатрат.

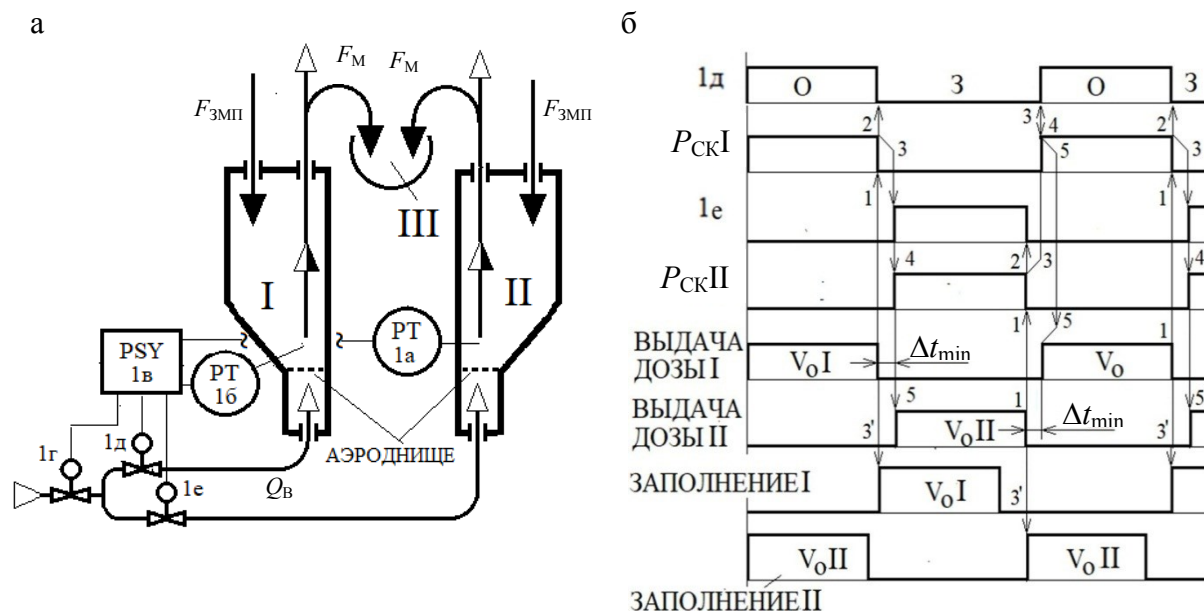


Рис. 4. Сдвоенный пневматический дозатор с ЧИМ управляющего сигнала:
а – структурная схема; б – циклограмма работы
в режиме максимальной производительности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была продемонстрирована возможность минимизации энергетических затрат при пневматической инициации движения ЗСМ, что позволило предложить для МФПП способы импульсного управления расходом сыпучих материалов в режиме минимальных удельных затрат на создание воздушного потока. Рассмотрены схемы технической реализации способа управления расходом ЗСМ и приведен способ расчета параметров импульсной последовательности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пешехонов А.А., Митрошин Д.Г., Чернуха М. Многофункциональные системы автоматической регламентации количества и расхода гранулированных материалов. *Сборник докладов Молодежной школы по проблемам управления в технических системах им. А.А. Вавилова*. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. С. 51–53.
2. Okrepilov V.V., Peshekhonov A.A., Chernikova, A.V., Rudakova I.V. Batching Actuator Device for Granular Material: Innovative Methods and Systems // *Measurement Techniques*. 2019. Vol. 61. No. 11. P. 1074–1080.
3. Островский Г.М. Прикладная механика неоднородных сред. СПб.: Наука, 2000. 359 с.

4. Бухмиров В.В., Родионов Г.А. Повышение энергетической эффективности пневмотранспортных систем. *Энергия инновации – 2012: Материалы отчетной конференции молодых ученых ИГЭУ*: в 6 т. Иваново: ИГЭУ, 2013. Т. 1. С. 48–52.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЕШЕХОНОВ Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации процессов химической промышленности, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», 190013, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26. E-mail: alanpeshekhonov@mail.ru

РУДАКОВА Ирина Викторовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации процессов химической промышленности, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», 190013, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26. E-mail: aphp@spbti.ru

ЧЕРНИКОВА Анна Владимировна – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по учебной и методической работе, Институт промышленного менеджмента, экономики и торговли, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: chernikova_av@spbstu.ru

КУЗЬМИНА Светлана Николаевна – доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой менеджмента и систем качества, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)», 197022, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5. E-mail: kuzmina2003@bk.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Пешехонов А.А., Рудакова И.В., Черникова А.В., Кузьмина С.Н. Энергосберегающее управление расходом зернистых сыпучих материалов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 1 (25). С. 34–43.

POWER SAVING GRANULAR BULK FLOW CONTROL

A.A. Peshekhonov¹, I.V. Rudakova¹, A.V. Chernikova², S.N. Kuzmina³

¹*St. Petersburg State Technological Institute (Technical University) (St. Petersburg)*

²*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg)*

³*St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"
named after V.I. Ulyanov (Lenin), (St. Petersburg)*

Abstract. Automatic systems with volumetric flow control of bulk materials are considered. For a certain area of particle size distribution and density, the advantage of pneumatic feeders over systems with mechanical action on bulk materials is shown. To minimize energy consumption, it is proposed to control the flow rate of loose material in the form of pulses with variable duty cycle, the amplitude of which ensures minimum specific energy consumption by air flow rate. Energy-efficient management of granular bulk solids is an important challenge in

various industries such as agriculture, food processing, construction and others. Efficient management of the flow rate of such materials can significantly reduce the cost and environmental impact. The key aspects whose research can be useful in this area are such as: process optimization, data monitoring and analysis, energy efficient technologies, inventory management, personnel training, use of alternative energy sources, and waste reduction. These measures can help not only in reducing costs, but also in making the business more sustainable in the face of changing market and environmental requirements.

Keywords: granular bulk materials, volumetric flow control, pulse control, minimum power consumption.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

PESHEKHONOV Alexey Anatolievich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation of Chemical Industry Processes, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), 26, Moskovsky pr., St. Petersburg, 190013, Russia. E-mail: alanpeshekhonov@mail.ru

RUDAKOVA Irina Viktorovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of Chemical Industry Processes, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), 26, Moskovsky pr., St. Petersburg, 190013, Russia. E-mail: aphp@spbti.ru

CHERNIKOVA Anna Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Educational and Methodological Work, Institute of Industrial Management, Economics and Trade, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: chernikova_av@spbstu.ru

KUZMINA Svetlana Nikolaevna – Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Management and Quality Systems, St. Petersburg State Electrotechnical University «LETI» named after V.I. Ulyanov (Lenin), 5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197022, Russia. E-mail: kuzmina2003@bk.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Peshekhonov A.A., Rudakova I.V., Chernikova A.V., Kuzmina S.N. Power saving granular bulk flow control // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 1 (25), pp. 33–43.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.354

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МЕТОДА УПРАВЛЯЕМОЙ ДЕСУЛЬФАТАЦИИ*****К.Б. Корнеев, М.Б. Маньков****Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Корнеев К.Б., Маньков М.Б., 2025

Аннотация. В статье отмечено, что модернизация электрических сетей и повышение доли альтернативных источников электроэнергии ведут к увеличению потребности в химических накопителях электрической энергии. Наряду с литий-ионными аккумуляторами для подобных нужд используют свинцовые аккумуляторы, требующие специальных мер для увеличения срока их службы. Данная техническая задача может быть решена с помощью специализированных зарядных устройств для управляемой десульфатации батарей. Сделан вывод, что за счет этого можно продлить ресурс батарей, уменьшить количество утилизируемых аккумуляторов и повысить энергозащищенность объектов, использующих такие батареи в качестве резервного источника.

Ключевые слова: энергоснабжение, аккумуляторная батарея, десульфатация, надежность, резервирование, охрана окружающей среды, ресурс.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-44-53

Значительные темпы роста и развития распределенной генерации, включая использование альтернативных источников электрической энергии, таких как ветровые генераторы и солнечные батареи, привели к необходимости широкого внедрения накопителей электроэнергии, которые могут компенсировать вынужденную неравномерность выработки электрической мощности. При этом для больших энергопроектов (мощностью выше 10 МВт) данная задача решается за счет применения химических, термических и механических систем накопления мощности и заряда. В то же время для проектов меньшей мощности, особенно для систем промежуточного хранения мощности (например, для накопления мощности в часы минимального тарифа с выдачей в сеть в часы максимального), а также для резервирования электрической сети у небольших потребителей II и III категорий надежности электроснабжения до сих пор используются электрохимические накопители мощности – аккумуляторы различных типов [1–3].

Среди наиболее известных примеров потребительского рынка можно выделить систему Powerwall различных версий, предлагаемую компанией Tesla. Единица мощности блока составляет от 7 до 11,5 кВт, при этом система управления циклом «заряд – разряд» оптимизирована в первую очередь для использования совместно с солнечными батареями, т.е. для сдвига потребления и покрытия вечернего максимума, характерного для бытовой нагрузки. В качестве накопительного элемента используется

литий-ионная батарея с заявленным сроком службы 10 лет (или 5 000 циклов зарядки (по данным компании производителя)). По факту для производства этого элемента применяются частично использованные аккумуляторные батареи с электромобилей Tesla, а также батареи, не прошедшие систему проверки качества для использования в электромобилях. В связи с более щадящими условиями эксплуатации применение подобных аккумуляторных батарей имеет под собой техническую подоплеку. Тем не менее литий-ионные аккумуляторы представляют наиболее пожароопасный элемент хранилищ электроэнергии. С ними связаны инциденты прошлых лет на предприятиях по выпуску аккумуляторов, а также в системах хранения электроэнергии. Приведем несколько заголовков статей, посвященных авариям на подобных хранилищах, случившимся за последние четыре года:

1. На сайте РБК в 2021 г. – «Система хранения энергии в Австралии возобновила работу после пожара» [4];

2. На сайте CNBS в 2022 г. – «Tesla Megapack battery caught fire at PG&E substation in California» (в пер. с англ. «Батарея Tesla Megapack загорелась на подстанции PG&E в Калифорнии») [5];

3. На сайте Reuters в июне 2024 г. – «Blaze at South Korea lithium battery plant kills 22 workers» (в пер. с англ. «Взрыв на южнокорейском заводе по выпуску литиевых батарей привел к смерти 22 рабочих») [6];

4. На сайте китайского производителя литиевых батарей о событии 4 сентября 2024 г. в Калифорнии – «Крупнейший в мире проект аккумуляторного хранения энергии находится под следствием из-за инцидента с перегревом» [7].

Несмотря на вышесказанное, в мире наблюдается постоянный рост количества установленных накопителей электроэнергии именно на литий-ионных аккумуляторах, что связано с универсальностью технологического процесса производства, возможностью сбора накопителей большой емкости из малых элементов (батареек потребительских типоразмеров), долгим сроком службы и высокой энергоемкостью. Однако к недостаткам таких батарей можно отнести невысокую пригодность для вторичной переработки, значительный вред, наносимый окружающей среде при неправильной утилизации, высокие энергозатраты и неэкологичность производства.

Таким образом, для промышленных систем накопления мощности, а также для создания резерва на случай аварийных отключений предпочтение отдается менее энергоэффективным, но отработанным технологиям на базе свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Обладая значительно меньшим ресурсом циклов «заряда – разряда», а также меньшей удельной емкостью хранения электроэнергии, эти аккумуляторы остаются в приоритете из-за значительно меньшей пожарной опасности, высокого коэффициента вторичной переработки, а также значительно меньшей зависимости уровня заряда от температуры, что позволяет вести их эксплуатацию в более широком диапазоне рабочих температур [8].

Литий-железо-фосфатные аккумуляторы (LiFePO_4), набирающие популярность в условиях эксплуатации на территории России, имеют существенный недостаток, связанный с невозможностью заряжать их при наличии отрицательных температур. Это существенно ограничивает применение данных аккумуляторов в качестве устройства резервирования мощности на необслуживаемых и неотапливаемых объектах электроэнергетики, расположенных в северных районах нашей страны.

К основным направлениям использования аккумуляторных батарей в качестве накопителей электроэнергии стоит отнести:

поставку электроэнергии со сдвигом во времени. Здесь подразумевается покупка недорогой электроэнергии, доступной в периоды, когда цены или издержки энергосистемы низкие, для зарядки батарей системы хранения, чтобы накопленная энергия могла быть использована или продана позднее, когда цена или издержки будут высокими. В качестве альтернативы можно рассмотреть возможность сохранить в часы минимального потребления избыточное производство энергии из возобновляемых источников на оборудовании, которое в противном случае должно быть выведено из процесса генерации (ветровые электростанции или фотоэлектрические преобразователи);

поддержку стабильности системы электроснабжения. В зависимости от обстоятельств в конкретной системе электроснабжения накопление энергии может использоваться для отсрочки покупки новых генерирующих мощностей для электростанции или мощности на оптовом рынке электроэнергии;

регулирование. Это одна из вспомогательных услуг, для которой хранение больших объемов электрической энергии является оптимальным. Сюда относится управление потоками мощности между разными зонами контроля и управления (например, между областями или зонами обслуживания разных электросетевых предприятий) для точного соответствия запланированным потокам мощности и реагирования на мгновенные изменения спроса в пределах зоны контроля [9]. Основной причиной включения регулирования в энергосистему является поддержание частоты сети.

В 2023 г. в мировой энергосистеме наметились некоторые положительные изменения. В ряде регионов увеличился объем инвестиций в развертывание электрических сетей, хотя результаты все еще не соответствуют желаемым. Экономики развитых стран и Китая продолжают лидировать в области инвестиций в электросети, на их долю приходится около 80 % мировых расходов [10]. Тем не менее стоит отметить значительный износ электросетей в мире, что требует инвестиций,кратно превышающих текущий уровень.

Китай сохранил уровень инвестиций на уровне 80 000 000 000 долларов, Соединенные Штаты Америки потратили 100 000 000 000 долларов (в основном на повышение надежности сетей и модернизацию старой инфраструктуры). Расходы в Евросоюзе (ЕС) значительно выросли и достигли эквивалента 60 000 000 000 долларов, чему способствовал План действий Европейской комиссии по сетям, нацеленный на установление уровня расходов на электрические сети на сумму более чем 600 000 000 000 долларов США в течение следующих шести лет.

Инвестиции в ЕС чрезвычайно важны, поскольку в настоящее время европейские системные операторы обслуживают около 10 000 000 км линий электропередач, по которым передается около 2 800 тераватт электроэнергии в год. При этом около 60 % европейской энергосистемы состоит из линий низкого напряжения (менее 1 000 В), 37 % – линий среднего напряжения (от 1 кВ до 35 кВ), лишь 3 % приходится на линии напряжением выше 35 кВ [11–13].

Дальнейшее увеличение объемов инвестиций в объединение сетей (рис. 1) крайне необходимо (например, для обеспечения потока возобновляемой энергии с рынков Южной Европы на рынки Центральной Европы). Однако строительство и модернизация линий низкого и среднего напряжения для передачи больших объемов электроэнергии нецелесообразны по причине наличия сверхнормативных потерь электроэнергии. При

этом строительство линий высокого напряжения сопряжено с необходимостью землеотведения, а также с большими капитальными затратами, низкой окупаемостью по причине высокой инфляции и дефицитом поставок энергетического оборудования (особенно трансформаторов).

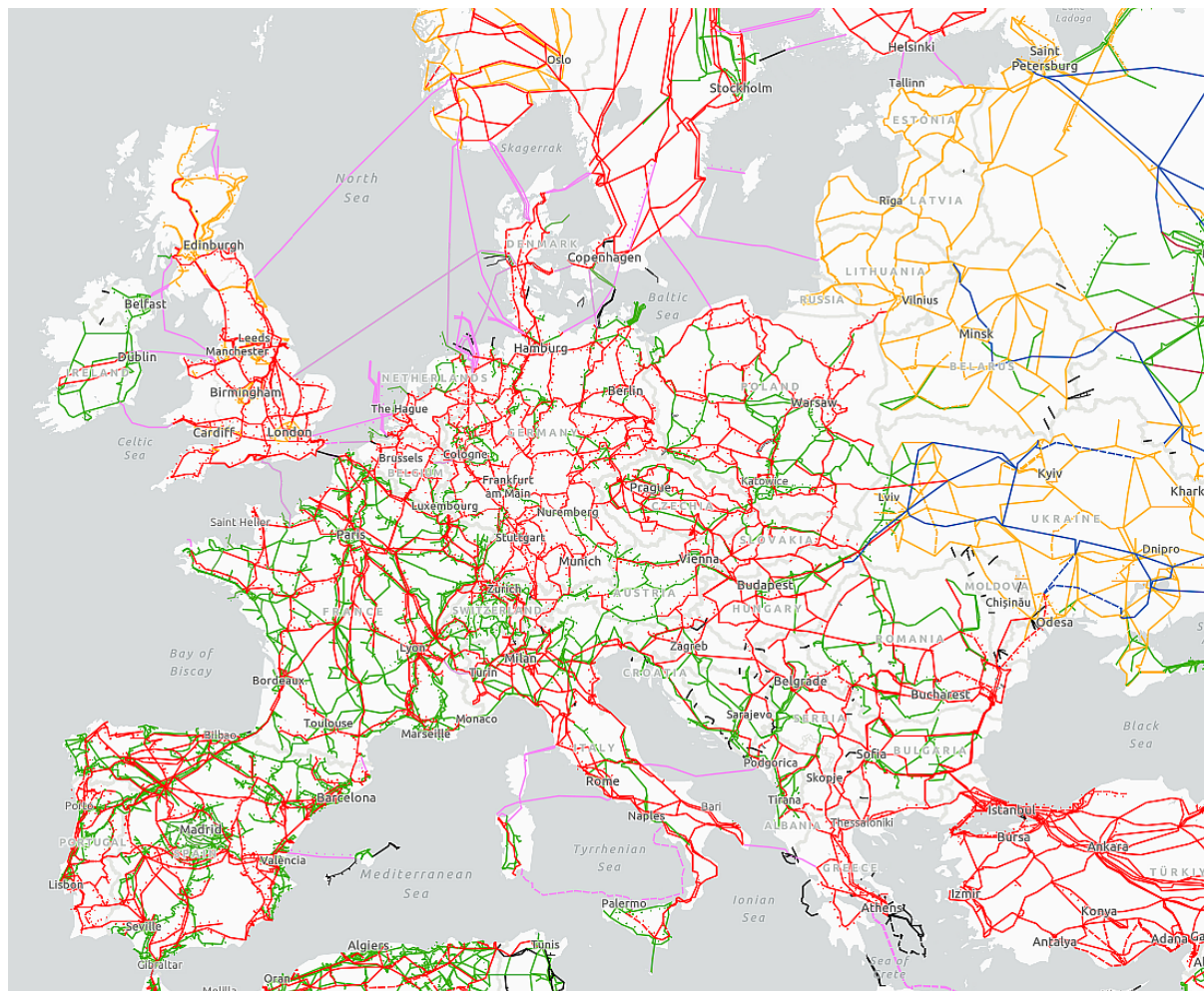


Рис. 1. Визуальное представление существующих в Европе высоковольтных линий [23]

Инвестиции в совершенствование электросетевого комплекса в развивающихся странах (за исключением Китая) выросли на впечатляющие 15 % и достигли почти 80 000 000 000 долларов США в 2023 г. Однако этот общий показатель скрыл падающий тренд инвестиций в некоторых странах. Инвестиции в Индии, например, остались на прежнем уровне, несмотря на проведение тендеров на интеллектуальные счетчики, из которых было установлено только 10 % от первоначального целевого числа. Инвестиции в Африке и Юго-Восточной Азии также в основном остались неизменными. Тем не менее этот недостаток новых инвестиций был частично компенсирован удвоением расходов в Латинской Америке (значительно увеличили расходы такие страны, как Колумбия, Чили, Панама и Бразилия). Бразилия добилась особого прогресса, выставив на аукцион

рекордные 10 500 км электрических сетей (при этом китайская компания China State Grid выиграла самый большой лот на обслуживание данных сетей). Энергосистемы многих развивающихся стран в значительной степени зависят от льготного государственного финансирования, что в случае дефицита бюджета приводит к значительному сокращению инвестиций.

Стоит отметить, что страны с развитой альтернативной энергетикой, а также государства, обладающие большой площадью, сталкиваются с проблемой управления потоками мощности. Если для первых особенно важным является накопление мощности в периоды максимума выработки солнечных и ветровых электростанций, то для таких больших по протяженности стран, как Россия, Китай, Канада и США, расположенных в нескольких часовых поясах, важным является управление широтными перетоками, связанными с несовпадениями максимумов нагрузки в географически смежных, но отличающихся по времени наступления максимума регионах. Поскольку механические, пневматические и гравитационные накопители мощности пока не получили большого распространения, приоритет отдается отработанным технологиям химических накопителей мощности.

Несмотря на то что батареи на основе лития постепенно вытесняют другие типы батарей (в первую очередь не за счет замены, а за счет увеличения доли в общем объеме установленных накопителей), кислотные аккумуляторные батареи продолжают массово использовать в качестве резервных источников тока в наиболее ответственных областях техники, таких как собственные нужды электрических станций и подстанций, резервные аккумуляторы для транспорта и т.п. В связи с этим поддержание эксплуатационных характеристик таких батарей остается значимым вопросом с точки зрения обеспечения гарантированной величины запасенной и отданной электрической энергии.

Сейчас имеется несколько способов восстановления свинцово-кислотных батарей, отличающихся друг от друга в первую очередь эффективностью и вероятностью получения в результате воздействий первоначальных характеристик аккумулятора. К ним относятся:

- зарядка повышенным напряжением;
- зарядка через балластное активное сопротивление;
- зарядка пониженным током с регулированием состава электролита;
- зарядка импульсными токами;
- десульфатация регулируемым током высокой частоты [15];
- совмещенный процесс зарядки и десульфатации с использованием асимметричных импульсов тока промышленной частоты [16].

Необходимо отметить, что публикации о методах восстановительной десульфатации более широко представлены в России, Китае и Индии, в то время как в европейских странах и США, постепенно замещающих кислотные аккумуляторные батареи их литий-ионными и литий-полимерными аналогами, таких работ заметно меньше. Тем не менее сохраняется растущий тренд на производство и использование свинцовых аккумуляторов в мире (рис. 2 [16]), но одновременно с этим наблюдается и значительное усиление негативного влияния некачественной утилизации (а также выбрасывания аккумуляторных батарей без утилизации) на здоровье населения, что можно увидеть по увеличению концентрации солей свинца в окружающей среде [17, 18]. Это приводит к тому, что концентрация свинца растет в крови (выявляется при лабораторных анализах) и оказывает психотропное, нейротоксическое и гемолитическое воздействия на человека. Данный

аспект вызывает беспокойство таких ведущих организаций, как Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП) [19] и Детский фонд ООН (ЮНИСЕФ) [20], и находит отражение в публикациях, посвященных теме загрязнения окружающей среды свинцом [21] (рис. 3).

Global Lead Acid Battery Market

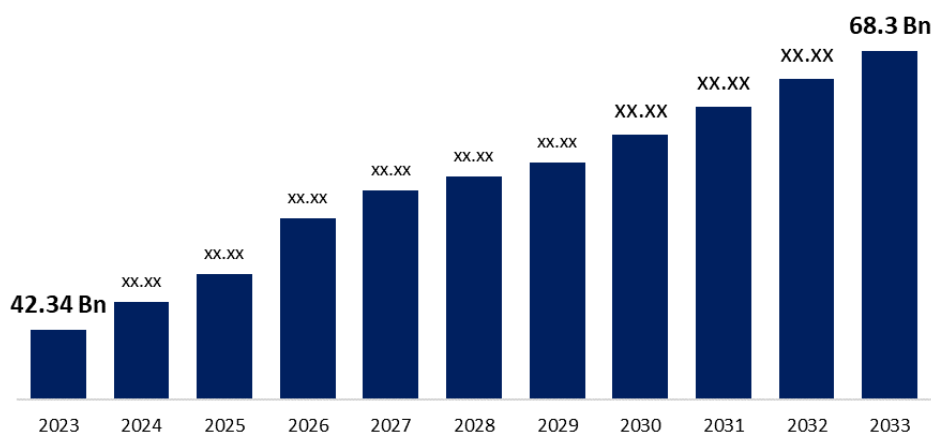


Рис. 2. Прогноз роста мирового рынка свинцовых батарей [16]

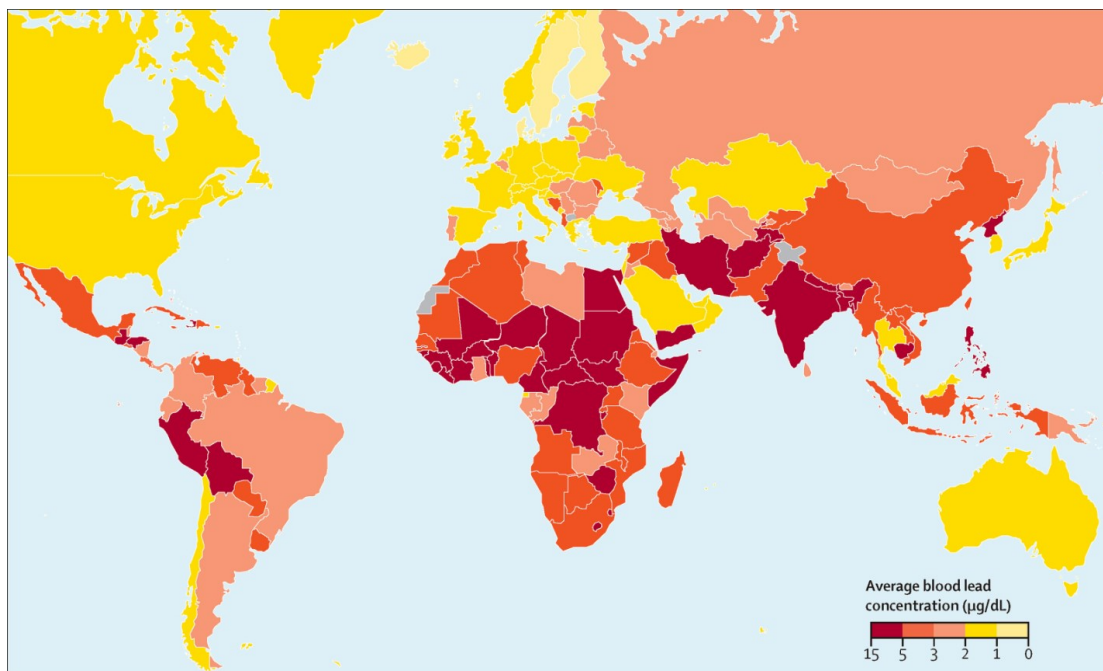


Рис. 3. Воздействие свинца на здоровье детей, представленное средней концентрацией свинца в крови (мкг/дл) (источник: [https://www.thelancet.com/cms/10.1016/S2542-5196\(22\)00090-0/asset/5889b34b-5904-4fd1-8118-5a0d89a98c38/main.assets/gr4.jpg](https://www.thelancet.com/cms/10.1016/S2542-5196(22)00090-0/asset/5889b34b-5904-4fd1-8118-5a0d89a98c38/main.assets/gr4.jpg))

Анализ показывает, что в настоящее время максимальные концентрации свинца характерны для стран с низким уровнем дохода. Это объясняется размещением в данных странах предприятий свинцовой промышленности, а также использованием территории таких государств в качестве площадок для размещения отработанных аккумуляторов (здесь можно назвать Гану и Замбию в Африке, а также Индию и Перу).

Таким образом, повышение ресурса свинцово-кислотных аккумуляторных батарей за счет десульфатации является актуальной технической задачей, решение которой не только позволяет устранить проблему ранней утилизации батарей, но и оказывает значительный положительный эффект на экономику целых регионов и окружающую среду. Особенно это актуально для хранилищ энергии большой мощности, поскольку появляется возможность увеличить срок службы установок, обеспечить сохранение их паспортных характеристик и повысить надежность функционирования электро-энергетических систем [22].

Одно из преимуществ метода десульфатации с использованием асимметричных импульсов тока промышленной частоты заключается в том, что процесс совмещается с зарядкой аккумулятора, и это позволяет уменьшить непроизводительный расход электро-энергии на восстановление работоспособности аккумулятора, а также обеспечить возможность интеграции электронной схемы десульфатации и зарядного устройства с целью повышения срока работоспособности батареи (а также увеличения числа циклов «заряд – разряд») без снижения эксплуатационных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Utility-Scale Battery Storage // *National Renewable Energy Laboratory* 2015. URL: https://atb.nrel.gov/electricity/2024/utility-scale_battery_storage (дата обращения: 11.02.2025).
2. Introduction to Grid Storage, Future Scenarios and Current Markets / N. Blair [et al.] // *Center for the New Energy Economy*. Colorado State University. 2011. URL: https://cnee.colorado.state.edu/wp-content/uploads/2024/07/CELA_EnergyStorage_July2024.pdf (дата обращения: 11.02.2025).
3. Аккумуляторная система хранения энергии BESS для эффективного использования энергетических ресурсов // *КЕДР Solutions*. 2015. URL: <https://kedrsolutions.ru/blog/akkumulyatornaya-sistema-hraneniya-ehnergii-bess> (дата обращения: 11.02.2025).
4. Колотович Н. Система хранения энергии в Австралии возобновила работу после пожара // *РБК*. 2021. URL: https://www.rbc.ru/quote/news/short_article/61b0aea69a79475b1c6d61f4 (дата обращения: 11.02.2025).
5. Kolodny L. Tesla Megapack Battery Caught Fire at PG&E Substation in California // *CNBC*. 2022. URL: <https://www.cnn.com/2022/09/20/tesla-megapack-battery-caught-fire-at-pge-substation-in-california.html> (дата обращения: 11.02.2025).
6. Daewoong K., Hongji K., Hyunsu Y. Blaze at South Korea lithium battery plant kills 22 workers // *Reuters*. 2024. URL: <https://www.reuters.com/world/asia-pacific/about-20-bodies-found-after-fire-south-korea-battery-plant-yonhap-reports-2024-06-24/> (дата обращения: 11.02.2025).
7. Крупнейший в мире проект аккумуляторного хранения энергии находится под следствием из-за инцидента с перегревом // *BSLBATT*. 2024. URL: <https://www.bslbattery.com/ru/news/the-worlds-largest-battery-energy-storage-project-is-under-investigation-due-to-overheating-incident/> (дата обращения: 11.02.2025).

8. Battery Energy Storage Systems – Power Arbitrage // *AURORA Power Consulting*. 2021. URL: <https://aurora-power.co.uk/battery-energy-storage-systems-power-arbitrage/> (дата обращения: 11.02.2025).
9. Корнеев К.Б., Павлова Ю.М., Осеи-Овусу Р. Алгоритмические модели управления электрической нагрузкой в системах электроснабжения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 3 (15). С. 40–50.
10. World Energy Investment 2024 // *International Energy Agency*. 2024. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/60fcd1dd-d112-469b-87de-20d39227df3d/WorldEnergyInvestment2024.pdf> (дата обращения: 11.02.2025).
11. Altvater S., Garcia J. Power Distribution // *Eurelectric*. 2023. URL: <https://www.eurelectric.org/policy-areas/power-distribution/> (дата обращения: 11.02.2025).
12. Castro A.T. Europe's Grids Are Not Up To Grade // *Breakthrough Energy*. 2024. URL: <https://www.breakthroughenergy.org/newsroom/articles/europe-grid-infrastructure/> (дата обращения: 11.02.2025).
13. Cremona E., Rosslowe C. Putting the Mission in Transmission: Grids for Europe's Energy Transition // *EMBER*. 2024. URL: <https://ember-energy.org/latest-insights/putting-the-mission-in-transmission-grids-for-europes-energy-transition/> (дата обращения: 11.02.2025).
14. Resonance Frequency-Based Desulfator Design for Lead-Acid Batteries / Tuyen Phong Truong [et al.]. In *Proceedings of the 2023 6th International Conference on Electronics, Communications and Control Engineering (ICECC '23)*. URL: <https://doi.org/10.1145/3592307.3592344> (дата обращения: 11.02.2025).
15. Патент РФ 2721006. Устройство для заряда и десульфатации / Маньков М.Б., Сидоров К.В. Заявл. 19.12.2019. Оpubл. 15.05.2020, Бюл. № 14.
16. Global Lead Acid Battery Market Size, Share, and COVID-19 Impact Analysis, By Construction Method (VRLA Lead Acid Battery, Flooded Lead Acid Battery), By Type (SLI, Stationary, Motive), By Application (UPS, Electric Bikes, Telecom, Transport Vehicles, Automotive, Others), By End-User (Transportation, Industrial, Utilities, Commercial & Residential), and By Region (North America, Europe, Asia-Pacific, Latin America, Middle East, and Africa), Analysis and Forecast 2023–2033 // *Spherical Insights*. 2024. URL: <https://www.sphericalinsights.com/press-release/lead-acid-battery-market> (дата обращения: 11.02.2025).
17. The Global Burden of Lead Toxicity Attributable to Informal Used Lead-Acid Battery Sites / B. Ericson [et al.] // *Annals of Global Health*. Vol. 82. Iss. 5. 2016. P. 686–699.
18. Gottesfeld P. The Lead Battery: A Growing Global Public Health Challenge // *American Journal of Public Health*. 2017. No. 107 (7). P. 1049–1050.
19. Used Lead Acid Batteries (ULAB) – Waste Lead Acid Batteries (WLAB) // *UN Environment Programme*. 2023. URL: <https://www.unep.org/topics/chemicals-and-pollution-action/pollution-and-health/heavy-metals/used-lead-acid-batteries> (дата обращения: 11.02.2025).
20. Rees N., Fuller R. The Toxic Truth: Children's Exposure to Lead Pollution Undermines a Generation of Future Potential // *UNICEF*. 2020. URL: <https://www.unicef.org/reports/toxic-truth-childrens-exposure-to-lead-pollution-2020> (дата обращения: 11.02.2025).
21. Pollution and Health: a Progress Update / R. Fuller [et al.] // *The Lancet Planetary Health*. 2022. Vol. 6. Iss. 6. P. 535–547.

22. Тренды цифровой трансформации электросетевого комплекса России / Е.А. Виноградов [и др.] // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 2 (6). С. 39–45.
23. ENTSO-E Transmission System Map. URL: <https://www.entsoe.eu/data/map/> (дата обращения: 23.12.2024).

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

МАНЬКОВ Матвей Борисович – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: dr.mankoff@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Корнеев К.Б., Маньков М.Б. Повышение ресурсных характеристик аккумуляторных батарей за счет использования метода управляемой десульфатации // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 1 (25). С. 44–53.

INCREASE IN THE LIFE CHARACTERISTICS OF BATTERIES BY USING THE CONTROLLED DESULPHATION METHOD

K.B. Korneev, M.B. Mankov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The paper notes that modernization of electric grids and increase in the share of alternative sources of electric power lead to an increased need for chemical storage of electric energy. Along with lithium-ion batteries, lead batteries are used for such needs, which require special measures to increase their service life. This technical problem can be solved by using specialized charging devices for controlled desulfation of batteries. It is concluded that due to this it is possible to prolong the life of batteries, reduce the number of utilized batteries and increase the power protection of facilities using such batteries as a backup source.

Keywords: energy supply, battery, desulfation, reliability, backup, environmental protection, resource.

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

MANKOV Matvey Borisovich – Postgraduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: dr.mankoff@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Korneev K.B., Mankov M.B. Increase in the life characteristics of batteries by using the controlled desulphation method // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 1 (25), pp. 44–53.

УДК 621.317

**ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ
МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СЧЕТЧИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

С.В. Маринова

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Маринова С.В., 2025

Аннотация. В статье рассмотрены аспекты определения межповерочного интервала микропроцессорных счетчиков электроэнергии. Приведено описание существующих методик с использованием показателей надежности. Показана необходимость корректировки межповерочных интервалов ряда микропроцессорных счетчиков.

Ключевые слова: метрологическая надежность, межповерочный интервал, микропроцессорный счетчик электроэнергии.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-53-60

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время микропроцессорный счетчик электроэнергии – это не только основа традиционных информационно-измерительных систем, но и неотъемлемая часть интеллектуальных систем учета (ИСУ) электроэнергии. Стабильность и метрологическая надежность микропроцессорного счетчика, как и любого средства измерений (СИ), являются необходимыми условиями достижения высокой точности измерений и обеспечения их единства.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕЖПОВЕРОЧНОГО ИНТЕРВАЛА

Документ РМГ 74-2004 [1] содержит рекомендации по методам расчета первоначального значения межповерочного интервала (МПИ) на этапе утверждения типа СИ. Существующие методы основаны на использовании формализованного описания зависимостей показателей точности метрологической надежности СИ от среднего времени их наработки с момента последней поверки. Метрологическая надежность в РМГ 74 основана на вероятности того, что в течение заданной наработки метрологический отказ не возникнет или средняя наработка на метрологический отказ будет равна математическому ожиданию наработки до первого метрологического отказа.

Среди перечисленных в РМГ 74-2004 методик определения первичного МПИ наиболее распространенной является методика ориентировочной оценки МПИ по нормируемым показателям надежности [2].

Определение МПИ осуществляют на основании моделирования зависимости показателей точности или метрологической надежности СИ от времени (наработки), прошедшего с момента последней поверки (калибровки) [1]. Кроме этого, модель процесса основана на предположении, что дрейф метрологических характеристик СИ обобщен и имеет нормальное распределение.

В РМГ 74-2004 предусмотрено применение двух критериев назначения МПИ:

- 1) нормируемых показателей метрологической надежности (нестабильности) СИ;
- 2) экономического критерия оптимальности МПИ, обеспечивающего максимальный экономический эффект эксплуатации СИ [1].

Первичное значение МПИ устанавливается при проведении испытаний СИ в целях утверждения типа. При этом погрешность определения оптимального значения МПИ может достигать десятков процентов [3]. Для более точного назначения первичного МПИ длительность испытаний должна составлять более 10 лет, что нецелесообразно, поэтому основное внимание следует уделять не назначению первичного значения МПИ, а его корректировке в процессе эксплуатации СИ.

На практике приведенные критерии назначения первичного МПИ могут противоречить друг другу, поскольку стоимость и частота поверки СИ сравнимы с полной стоимостью самого СИ.

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Со временем системы учета переводят в цифровой вид, а приборы, входящие в их состав, становятся более сложными и дорогостоящими. Основным элементом в измерительной системе для определения количества израсходованной (выданной) электроэнергии и мощности стал счетчик. Это не только прибор для интеграции значений тока и напряжения, но и микропроцессорное вычислительное устройство, имеющее интегральную микросхему для вычисления, запоминающее устройство для хранения измеренной информации и журнала событий, периферийное оборудование для выдачи сигнала стандартного уровня интерфейса. Таким образом, счетчик – это не только СИ, но и сложное электронное устройство (другими словами, промышленный компьютер).

Для микропроцессорных счетчиков, которые содержат большое число электронных модулей [4], на ранних этапах проектирования СИ применяются расчетные методы, основанные на стандартизованных методиках [5] и данных о характеристиках надежности электронной компонентной базы [6].

Для микропроцессорных измерительных приборов (каковыми являются микропроцессорные счетчики), которые содержат большое число электронных модулей, предназначенных для генерирования, вычисления, усиления аналого-цифрового преобразования и прочего, методики расчета приведены в источнике [7].

Средняя наработка на отказ и вероятность безотказной работы в документе [7] рассчитываются методом «λ-характеристик»:

$$T_0 = 1 / \lambda, \quad (1)$$

где T_0 – средняя наработка на отказ электронного средства измерений (ЭСИ);
 λ – интенсивность отказов ЭСИ.

Наиболее распространенной моделью надежности принимают экспоненциальную зависимость распределения времени до отказа, по которой вероятность безотказной работы может быть выражена уравнением

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \text{ или } P(t) = e^{(-\frac{t}{T})}, \quad (2)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы ЭСИ; t – наработка (время наработки) ЭСИ.

Интенсивность отказов ЭСИ определяется как сумма соответствующих интенсивностей отказов всех входящих в него i -х электронных компонентов:

$$\lambda = \sum_{i=1}^I \lambda_{\text{э}i},$$

где $\lambda_{\text{э}i}$ – интенсивность отказов i -го электронного компонента (ЭК) в режиме работы; i – общее число ЭК в ЭСИ.

Условия работы всех ЭК в модели, т.е. в ЭСИ, отличаются от нормальных, поэтому необходимо учесть интенсивность отказов в соответствующих эксплуатационных условиях $\lambda_{\text{э}}$ (например, с учетом электрического режима, внешних факторов, конструкторско-технологических особенностей):

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_0 \prod_{j=1}^J K_j,$$

где λ_0 – базовая интенсивность отказов ЭК в режиме работы; K_j – j -й коэффициент математической модели интенсивностей отказов ЭК, учитывающий влияние j -го фактора; J – общее число коэффициентов в математической модели (факторов).

Математические модели интенсивности отказов ЭК (формулы) и численные значения их коэффициентов приведены в справочнике [6].

Для расчета первоначального значения МПИ используются справочные данные по методике, указанной в п. А.5 РМГ 74-2004 «Методика ориентировочной оценки первичного МПИ или межкалибровочного интервала по нормируемым показателям надежности средств измерений» [1]:

$$\Delta T_{\text{МПИ}} = \min(T_1, T_2),$$

где $\Delta T_{\text{МПИ}}$ – первоначальное значение МПИ; T_1, T_2 – значения времени.

Если рассчитана вероятность безотказной работы $P(t)$, то с допущением о линейном изменении среднего значения погрешности (по совокупности СИ данного типа) при неизменном среднеквадратическом отклонении распределения погрешности σ_0 (линейный случайный процесс дрейфа по РМГ 74-2004) значения T_1, T_2 определяются по формулам:

$$T_1 = t \cdot \frac{\ln(\frac{\Delta_{\text{э}}}{\chi_{P^*_{\text{МИ}}} \cdot \sigma_0})}{\ln(\frac{\Delta_{\text{э}}}{\chi_P \cdot \sigma_0})}; \quad T_2 = t \cdot \frac{\Delta_{\text{э}} - \chi_{P^*_{\text{МИ}}} \cdot \sigma_0}{\Delta_{\text{э}} - \chi_P \cdot \sigma_0}, \quad (3)$$

где σ_0 – среднеквадратическое отклонение распределения погрешности градуировки при выпуске из производства; Δ – предел допускаемой погрешности, нормируемый в технических условиях (ТУ); $\Delta_{\text{э}}$ – предел допускаемой погрешности в фактических реальных условиях эксплуатации; $P^*_{\text{МИ}}$ – вероятность метрологической исправности в момент времени $T_{\text{МПИ}}$ (за время $\Delta T_{\text{МПИ}}$); $\chi_P, \chi_{P^*_{\text{МИ}}}$ – квантили нормированной функции Лапласа $F(\chi)$, соответствующие вероятностям $P(t)$ и $P^*_{\text{МИ}}$.

$$F(\chi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\chi}^{+\chi} e^{-\frac{z^2}{2}} dz.$$

Если рассчитано T_0 , то значения T_1 и T_2 определяются по формулам:

$$T_1 = T_0 \cdot \frac{\ln\left(\frac{\Delta_{\text{э}}}{\chi_{P^*_{\text{МИ}}} \cdot \sigma_0}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta_{\text{э}}}{\sigma_0} + 0,635\right)}; \quad T_2 = T_0 \cdot \frac{\Delta_{\text{э}} - \chi_{P^*_{\text{МИ}}} \cdot \sigma_0}{\Delta}. \quad (4)$$

Из выражений (1) и (2) следует, что период $\Delta T_{\text{МПИ}}$, рассчитанный по формулам (4), будет больше, чем период, рассчитанный по формулам (3) [4].

Численные расчеты по формулам (3) и (4) могут существенно различаться (в несколько раз и даже на порядок). В том же РМГ 74-2004 приведены примеры расчетов, которые это подтверждают.

При расчетах двумя способами (по формулам (3) с определенной вероятностью безотказной работы $P(t)$ и по формулам (4) со средней наработкой на отказ ЭСИ) получим «нижнюю оценку» в виде значения $\Delta T_{\text{МПИ}}$. В то же время в ТУ обычно нормируют T_0 [2], что в дальнейшем при использовании соотношений (4) приводит к завышению оценки первоначального МПИ ЭСИ.

Имеющиеся методы определения МПИ имеют грубые допущения. Выше было указано, что при моделировании процессов изменения метрологических характеристик используется нормальное распределение, но это далеко не всегда подтверждается на практике. Процесс деградации каждой метрологической характеристики в течение времени является случайным процессом, который имеет свои числовые характеристики, а в методах, указанных в РМГ 74-2004, либо выделяют одну метрологическую характеристику, либо полагают, что все метрологические характеристики подчиняются одинаковому закону распределения с одними и теми же числовыми характеристиками. Кроме этого, расчет по безотказности не отражает действительные изменения метрологических характеристик, так как очевидно, что не каждый отказ ЭСИ является метрологическим в общем потоке отказов. Использование усредненных показателей метрологической надежности СИ приводит к достаточно грубым результатам вычислений МПИ электронных устройств [8].

Одним из способов выхода из ситуации с расчетами первоначального МПИ микропроцессорных счетчиков по вариантам РМГ 74-2004, которые дают неудовлетворительный разброс нижнего и верхнего предела МПИ, может быть использование показателей долговечности вместо показателей надежности.

Долговечность – это свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта [9].

К показателям долговечности, которые можно использовать для ЭК, относятся:
средний ресурс до ремонта/списания;
средний срок службы до ремонта/списания.

Согласно классификации изделий, при задании требований по надежности [10] режим применения электронных счетчиков можно рассматривать как режим непрерывного длительного применения, при этом сам счетчик относится к изделиям конкретного

назначения. Для таких восстанавливаемых устройств в соответствии с документом [11] в качестве показателей безотказности и ремонтпригодности лучше выбирать среднюю наработку на отказ T_0 и среднее время восстановления $T_в$.

Электронный счетчик рассматривается как модель циклического применения, а поверка принимается за первую фазу ремонта ЭСИ (обычно в процессе поверки еще меняется питающий элемент – батарея счетчика). Следовательно, МПИ в терминах, указанных ГОСТ 27.003, будет представлять собой назначенный срок службы до ремонта ($T_{сл. н. р}$), его расчетное значение будет численно равно $\Delta T_{МПИ}$, которое в соответствии с ГОСТ 27.003 определяется как

$$T_{сл. н. р} = n \cdot T_{сл. \gamma \rho}, \quad (5)$$

где n – часть, которую должен составлять $T_{сл. н. р}$ от $T_{сл. \gamma \rho}$; $T_{сл. \gamma \rho}$ – гамма-процентный срок службы ЭСИ до ремонта; γ – доверительная вероятность.

При циклическом режиме функционирования ЭСИ значение $T_{сл. \gamma \rho}$ определяется как

$$T_{сл. \gamma \rho} = T_{р. \gamma \rho} / K_{и.э},$$

где $T_{р. \gamma \rho}$ – гамма-процентный ресурс ЭСИ до ремонта; $K_{и.э}$ – коэффициент интенсивности эксплуатации ЭСИ.

В соответствии с источником [7] предельное состояние ЭСИ характеризуется снижением эффективности использования ЭСИ за счет снижения надежности, определяется по выработке ресурса у определенного процента ЭК от общего числа компонентов, входящих в состав ЭСИ. При расчетах отслеживаемых показателей долговечности ЭСИ этот процент равен 0. Поэтому

$$T_{р. \gamma \rho} = \min (T_{р. \gamma 1}, T_{р. \gamma 2}, \dots, T_{р. \gamma i}),$$

где $T_{р. \gamma i}$ – гамма-процентный ресурс i -го ЭК в режиме применения ЭСИ.

При циклическом и облегченном режиме применения ЭК значение $T_{р. \gamma i}$ определяют по формуле

$$T_{р. \gamma i} = \frac{T_{р. \gamma i}(ТУ)}{K_{и.э i} \cdot K_{н i}},$$

где $T_{р. \gamma i}(ТУ)$ – гамма-процентный ресурс i -го ЭК во всех режимах и условиях применения, заданных ТУ; $K_{и.э i}$ – коэффициент интенсивности применения i -го ЭК в режиме эксплуатации ЭСИ; $K_{н i}$ – коэффициент нагрузки i -го ЭК по отслеживаемому параметру.

В состав микропроцессорных счетчиков электроэнергии входят ЭК: электронный модуль, который состоит из основной электронной платы (осуществляющей функции измерения и регистрации ряда параметров), жидкокристаллического индикатора, элементов оптического порта; литиевая батарея. На основной электронной плате установлены следующие элементы: источник питания, резистивные делители напряжения для всех трех фаз и шунтирующие резисторы для трех трансформаторов тока, кварцевый генератор на 12,2 МГц для задания тактовой частоты и на 32 768 Гц для задания хода часов, специализированная сверхбольшая интегральная схема, микроконтроллер для обработки и регистрации данных на жидкокристаллическом индикаторе, схема сброса электрически перепрограммируемого EEPROM для хранения данных конфигурации и вспомогательных констант [12].

Для определения первичного МПИ микропроцессорного счетчика с использованием показателей долговечности применяются данные вероятности метрологической исправности $P_{МИ}^* = 0,9$, пределы допускаемой погрешности СИ, нормируемые ТУ в размере $\Delta = 0,5 \%$ и в условиях эксплуатации $\Delta_э = 0,5 \%$, среднеквадратическое отклонение распределения

погрешности градуировки (σ_0) при выпуске из производства принимают 0,05 %, средняя наработка до отказа, ч, принимается по данным производителей соответствующих комплектующих счетчика, перечисленных выше.

Оценивая важность назначенного срока службы до ремонта для имеющихся данных в виде средней наработки до отказа, примем коэффициент интенсивности эксплуатации для каждого ЭК равным 1.

В практических расчетах с использованием показателей безотказности для оценки периода до ремонта ЭСИ [4] получаются значения МПИ от единиц месяцев до полутора сотен лет, что вызывает сомнения в применимости такого подхода, рекомендуемого источниками [1] и [7], для счетчика как ЭСИ.

Методика расчета на базе показателей долговечности ЭК, входящих в состав ЭСИ, позволяет получить более адекватные значения МПИ. Пересчитав первичный МПИ счетчика по формулам (3), получим период чуть более 11 лет. Точность полученных значений первичных МПИ для любого СИ, в том числе и для ЭСИ, трудно оценить на адекватность, поскольку их нашли расчетными способами и они должны быть подтверждены экспериментальными данными, что требует времени и статистических результатов. Экспериментальные данные должны быть использованы для повышения точности прогнозирования МПИ ЭСИ и ее дальнейшей корректировки.

С течением времени в отдельных элементах и механизмах СИ происходят процессы «старения», которые приводят к отказам СИ, в том числе метрологических. Определяющими факторами являются эксплуатационные условия, влияющие на метрологическое состояние ЭСИ.

Для определения МПИ в РМГ 74-2004 рекомендованы методики, в которых могут учитываться данные по испытаниям или результаты эксплуатации, но уже с использованием показателей безотказности. Такие же испытательные данные можно использовать для расчета МПИ по показателям долговечности. Если есть данные по расчетным и экспериментальным значениям, то вводят поправочный коэффициент [4], определяемый как

$$K = \frac{\Delta T_{МПИ_{\text{экс}}}}{\Delta T_{МПИ_{\text{расч}}}}, \quad (6)$$

где $\Delta T_{МПИ_{\text{экс}}}$ – экспериментальное значение МПИ ЭСИ; $\Delta T_{МПИ_{\text{расч}}}$ – расчетное значение МПИ ЭСИ.

Данное значение поправочного коэффициента K (см. формулу 6), которое зависит как от экспериментальных, так и от расчетных значений МПИ, вводят в формулу (5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методики расчета первоначальных значений МПИ на базе показателей безотказности СИ малопригодны для микропроцессорных счетчиков электроэнергии. Для электронных счетчиков при оценке первичных МПИ можно использовать методику на базе показателей долговечности, срока службы до ремонта. Такие показатели можно применять не только для расчета МПИ электронных счетчиков, работающих автономно, но и для определения МПИ счетчиков в составе автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета электроэнергии.

Кроме этого, в РМГ 74-2004 предусмотрен единый МПИ для всех СИ вне зависимости от их возраста и порядкового номера поверки. Для оценки методов определения МПИ сравним расчетные данные, приведенные в описании типа

электронного счетчика [12], с опытными данными, полученными в ходе поверки. В описании типа электронного счетчика [12] указана средняя наработка на отказ 120 000 ч, МПИ рассчитан и составляет 12 лет. Когда счетчик эксплуатируется по назначению в условиях, отличных от нормальных, электронные элементы подвергаются физическому изменению, происходит скрытое снижение метрологической надежности. Согласно данным Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии за 2020–2024 гг., в результате очередной поверки некоторые счетчики [12] показали выход фактических погрешностей за нормируемые пределы. Доля забракованных счетчиков превысила допустимую норму. Следовательно, у микропроцессорных счетчиков такого типа должен быть скорректирован МПИ.

Ведение научно-исследовательских работ в области создания методов корректировки МПИ микропроцессорных счетчиков является одной из приоритетных задач при достижении необходимой точности измерений автоматизированных цифровых систем, в том числе ИСУ [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РМГ 74-2004. ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. М.: Стандартинформ, 2006. 24 с.
2. Ченцова С.В. Расчет первичного межповерочного интервала по нормируемым показателям надежности средств измерений. *Современные техника и технологии: Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. С. 141–142.
3. Новицкий П.В., Зограф И.А., Лабунец В.С. Динамика погрешностей средств измерений. Л.: Энергоатомиздат, ленингр. отд-ние. 1990. 192 с.
4. Жаднов В.В. Методы повышения достоверности и оценки межповерочных интервалов электронных измерительных приборов // *Приборы, методы, технологии*. 2015. № 11. С. 20–27.
5. ОСТ 4.012.013-84. Отраслевой стандарт. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности. URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/ost_otraslevoj-standart/0/ost_4_012_013-84_otraslevoy_standart_apparatura.html (дата обращения: 23.01.2025).
6. Надежность ЭРИ: справочник. М.: МО РФ, 2006. 641 с.
7. ОСТ 4Г 0.012.242-84. Аппаратура радиоэлектронная. Методы расчета показателей надежности. URL: <https://m.eruditor.one/file/965558/> (дата обращения: 23.01.2025).
8. Гусеница Я.Н., Шерстобитов С.А., Малахов А.В. Научно-методический аппарат обоснования межповерочных интервалов средств измерений // *Вестник СибГУТИ*. 2017. № 1. С. 40–46.
9. ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины определения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181141> (дата обращения: 23.01.2025).
10. Боровиков С.М., Цырельчук Н.Н., Троян Ф.Д. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств: учебно-методическое пособие / под ред. С.М. Боровикова. Минск: БГУИР, 2010. 68 с.
11. ГОСТ 27003-2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200144951> (дата обращения: 23.01.2025).

12. Счетчик электрической энергии трехфазный многофункциональный Альфа А2. Руководство по эксплуатации. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://simenergo.com/1docs/elster/a2_rykovodstvo_iksplyatazii.pdf?ysclid=mamk370unr158166483 (дата обращения: 23.01.2025).
13. Новиков А.Н. Определение параметров метрологического обслуживания средств измерений по технико-экономическому критерию // *Вестник метролога*. 2022. № 4. С. 12–18.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАРИНОВА Светлана Васильевна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tgту_kafedra_ese@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Маринова С.В. Особенности метрологической надежности микропроцессорных счетчиков электроэнергии // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 1 (25). С. 53–60.

PECULIARITIES OF METROLOGICAL RELIABILITY OF MICROPROCESSOR-BASED ELECTRICITY METERS

S.V. Marinova

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article deals with the aspects of determination of the microprocessor electricity meters verification interval. Detailed description of the method which use of existing techniques with reliability indicators. The need for adjustment is shown microprocessor electricity meters verification interval correct.

Keywords: metrological reliability, verification interval, microprocessor electricity meters.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MARINOVA Svetlana Vasilevna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgту_kafedra-ese@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Marinova S.V. Peculiarities of metrological reliability of microprocessor-based electricity meters // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2025. No. 1 (25), pp. 53–60.

УДК 621.3.013.1, 537.611.2

**ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ КВАНТА
МАГНИТНОГО ПОТОКА****В.Д. Павлов***Владимирский электромеханический завод (г. Владимир)*

© Павлов В.Д., 2025

Аннотация. Двухчастичной системе коррелированных электронов приписывается квант кинетического момента. Вследствие этого минимально возможный магнитный поток (квант) стал в два раза меньше, чем поток, рассчитанный для одного электрона. Здесь есть противоречие, поскольку магнитный поток – величина аддитивная, поэтому естественнее было бы ожидать его увеличения, а не уменьшения. Цель исследования заключается в разрешении указанного противоречия. Возможность создания магнитного потока двухчастичной системой электронов и его измерения не является оригинальной. Магнитный поток может создаваться и единственным электроном. Подобно тому как при парной корреляции квант магнитного потока вдвое уменьшился по сравнению с квантом Ф. Лондона, при n -кратной корреляции квант уменьшится в n раз. Этому нет разумного объяснения. Приписывание куперовской паре кванта кинетического момента неприемлемо. Квантом кинетического момента следует наделять единственную частицу и не следует наделять систему частиц.

Ключевые слова: квантовая структура, коррелированные электроны, проводник, длина свободного пробега, кинетический момент, магнитный поток.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-61-67**ВВЕДЕНИЕ**

В 1948 г. Ф. Лондон вычислил квант магнитного потока от электрического тока, созданного одним электроном. Ключевым условием вычисления явилось приписывание электрону кванта кинетического момента $\hbar$ [1].

В 1956 г. Л. Купер описал двухчастичные системы коррелированных электронов (куперовские пары), возникающие в проводниках вследствие электрон-фононного взаимодействия. Приписывание двухчастичной системе кванта кинетического момента $\hbar$ приводит к уменьшению вычисляемого значения кванта магнитного потока вдвое.

В 1961 г. Б.С. Дивер и У.М. Фэрбэнк, а также независимо Р. Долл и М. Небауэр измерили квант магнитного потока. Результат оказался вдвое меньше кванта Ф. Лондона. С тех пор считается, что квант магнитного потока создается исключительно куперовскими парами и что он вдвое меньше кванта Ф. Лондона.

Цель исследования заключается в переосмыслении указанных обстоятельств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ***Об исключительности двухчастичных систем
при создании магнитного потока***

Парные корреляции возникают в проводниках с малой длиной свободного пробега электронов и не возникают в проводниках с большой длиной свободного пробега [2].

Считается, что квант магнитного потока от двухчастичной системы измерен (в 1961 г.) для проводников с малой длиной свободного пробега электронов. Однако это обстоятельство не может исключать возможность измерения кванта магнитного потока от одного электрона в проводнике с большой длиной свободного пробега электронов (в котором парные корреляции не возникают). Это возможно, так как данный квант (Ф. Лондона) в два раза больше измеренного в 1961 г. К тому же и чувствительность измерительной аппаратуры заметно возросла.

Таким образом, возможность создания магнитного потока двухчастичной системой электронов и его измерения не является оригинальной. Магнитный поток может создаваться и единственным электроном.

Магнитное квантование от проводника с большой длиной свободного пробега электронов

Энергия магнитного потока выражается как

$$E = \frac{I\Phi}{2},$$

где Φ – магнитный поток.

Ток от единственного электрона можно выразить по формуле

$$I = \frac{e}{T},$$

где T – время, за которое электрон делает один оборот в круговом контуре:

$$T = \frac{2\pi R}{v},$$

где R – размер кругового контура; v – линейная скорость заряда.

В то же время

$$E = \frac{m_e v^2}{2}.$$

Сопоставление приведенных выражений дает возможность получить Φ :

$$\Phi = \frac{2\pi R m_e v}{e} = \frac{2\pi R p}{e}, \quad (1)$$

где p – количество движения.

Так как электрон не коррелированный (единственный), двояких толкований кванта его кинетического момента не существует:

$$m_e v R = p R = \hbar. \quad (2)$$

Поэтому

$$\Phi_L = \frac{2\pi\hbar}{e} = -\frac{h}{e}. \quad (3)$$

Последнее выражение – хрестоматийное значение кванта Φ . Лондона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Магнитное квантование от тока, созданного двумя электронами

Ток от двух движущихся зарядов вдвое больше, чем от одного. При этом не существует никакой разницы в том, коррелированные заряды или нет.

Магнитный поток от удвоенного тока вдвое больше, чем от неудвоенного [3, 4].

Таким образом, с учетом выражения (2)

$$\Phi_2 = 2\Phi_L = \frac{2h}{e}.$$

Хрестоматийное значение кванта магнитного потока, созданного куперовской парой, вчетверо меньше:

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e}. \quad (4)$$

Получение величины (4) возможно только при сложении величин, обратных выражению (3):

$$\frac{1}{\Phi} = \frac{1}{\Phi_L} + \frac{1}{\Phi_L} = \frac{2}{\Phi_L} = \frac{2e}{h}. \quad (5)$$

Это не согласуется с существующими теориями.

Парные корреляции – не предел

При хрестоматийном вычислении кванта магнитного потока учитывались только куперовские пары электронов, т.е. их парные корреляции.

Вместе с тем в такой же мере или даже в меньшей могут возникать корреляции большего числа электронов.

Подобно тому как при парной корреляции квант магнитного потока вдвое уменьшился по сравнению с квантом Φ . Лондона, при n -кратной корреляции квант уменьшится в n раз:

$$\Phi_0 = \frac{h}{ne}. \quad (6)$$

Аналогично выражениям (4) и (5) выражение (6) не согласуется с существующими теориями.

Магнитное квантование от проводника с малой длиной свободного пробега электронов

Если считать формулу (4) для куперовской пары достоверной, то один электрон создает половину потока, созданного парой:

$$\Phi_0 = \frac{1}{2} \frac{h}{2e} = \frac{h}{4e}.$$

Если имеет место n -частичная корреляция электронов, то

$$\Phi_0 = \frac{1}{n} \frac{h}{2e} = \frac{h}{n^2 e}.$$

Имеется феномен дробления кванта, что недопустимо по определению.

О двойных стандартах

Два коррелированных электрона плохого проводника наделяются квантом $\hbar$ кинетического момента на том основании, что это *квантовая система*. С этим следовало бы согласиться, если бы данный подход распространялся и на другие подобные квантовые системы (например, на два электрона гелия (роль фононов, посредством которых связываются коррелированные электроны, у гелия играет сила притяжения со стороны ядра атома [5])). Предположим, что это верно. Другими словами,

$$2m_e v r_{\text{He}} = \hbar. \quad (7)$$

К электрону приложены три силы: притяжение к ядру, отталкивание от другого электрона и центробежная сила:

$$\begin{aligned} \frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{\text{He}}^2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 (2r_{\text{He}})^2} &= \frac{m_e v^2}{r_{\text{He}}}; \\ 1,75 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{\text{He}}^2} &= \frac{m_e v^2}{r_{\text{He}}}. \end{aligned} \quad (8)$$

После возведения выражения (7) в квадрат получаем:

$$\begin{aligned} 4m_e^2 v^2 r_{\text{He}}^2 &= \hbar^2; \\ r_{\text{He}}^3 &= \frac{\hbar^2}{4m_e^2 v^2}. \end{aligned}$$

Тогда соотношение (8) приобретает вид:

$$\begin{aligned} 1,75 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{4m_e^2 v^2}{\hbar^2} &= \frac{m_e v^2}{r_{\text{He}}}; \\ r_{\text{He}} &= \frac{m_e v^2 4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{1,75 e^2 4m_e^2 v^2} = \frac{\hbar^2}{1,75 e^2 4m_e} = \frac{\hbar^2}{7}. \end{aligned}$$

В количественном выражении

$$r_{\text{He}} = \frac{a_0}{7} = \frac{5,291\,772\,109\,2 \cdot 10^{-11}}{7} \approx 7,56 \cdot 10^{-12} \text{ (м)}.$$

Результат отличается от табличного значения почти вчетверо.

В то же время если не паре, а каждому электрону приписать квант $\hbar$ кинетического момента, то результат окажется правильным.

Из этой ситуации есть два возможных выхода:

1. Пару электронов гелия не следует наделять квантом $\hbar$ кинетического момента, поэтому во избежание двойных стандартов им (квантом $\hbar$) *не следует* наделять и прочие многочастичные системы, к которым относится и куперовская пара электронов.

2. Многочастичные квантовые системы *следует* наделять квантом $\hbar$ кинетического момента, в том числе и пару электронов гелия. Однако тогда придется признать, что радиус атома гелия в четыре раза меньше, чем принято считать.

Первый вариант представляется более предпочтительным.

Магнитный поток, обусловленный спином электрона

Геометрическая форма электрона неизвестна, но считается, что это не шар и не сфера. Это следует из формулы его классического радиуса:

$$r_e = \frac{\mu_0 e^2}{4\pi m_e}.$$

В случае шара формула имеет вид

$$r_e = \frac{3}{5} \frac{\mu_0 e^2}{4\pi m_e}.$$

В случае сферы формула выглядит следующим образом:

$$r_e = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 e^2}{4\pi m_e}.$$

Полная неопределенность формы электрона позволяет непротиворечиво представить его спин в виде момента импульса, образованного материальной точкой с массой электрона, обращающейся по окружности неопределенного радиуса (сколь угодно малого, причем его величина значения не имеет). Этот подход может иметь недостатки, но также имеет и существенное достоинство в виде возможности использовать готовую формулу (1) (вкупе с предшествующими формулами).

Спин электрона вычисляется по формуле

$$L_{es} = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar.$$

С учетом формулы (1) квант магнитного потока, обусловленного спином электрона, можно выразить как

$$\Phi_{es} = \frac{2\pi R p}{e} = \frac{2\pi L_{es}}{e} = \frac{2\pi}{e} \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\hbar}{e}. \quad (9)$$

Данные, полученные в 1961 г.

Круговой ток в лабораторной трубке, образованный одним электроном, создает магнитный поток (3).

Спин электрона может иметь лишь две проекции на направление магнитного поля потока (3), а именно:

$$L_{esB} = \pm \frac{\hbar}{2}.$$

В силу закона сохранения момента импульса спин противоположен орбитальному моменту. Поэтому

$$L_{esB} = -\frac{\hbar}{2}.$$

Следовательно, магнитный поток, обусловленный спином электрона, вычитается из потока (3) (его проекция).

Таким образом, в 1961 г. измерили орбитальный квант магнитного потока *одного* электрона за вычетом проекции спинового кванта магнитного потока:

$$\frac{h}{e} - \frac{h}{2e} = \frac{h}{2e}, \quad (10)$$

а не квант от куперовской пары.

Совпадение измеренного значения (10) с (4) является совершенно случайным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кинетический момент – это аддитивная величина. Моменты, развиваемые каждым элементом многочастичной системы, складываются. И если кинетический момент многочастичной системы равен кванту $\hbar$, то это значит, что одна частица (электрон) имеет кинетический момент, равный дробной части кванта. Однако если квант дробится на части, то это уже не квант.

Таким образом, приписывание куперовской паре кванта $\hbar$ кинетического момента совершенно неприемлемо.

В действительности существуют квант Φ Лондона (3), квант магнитного потока (9), обусловленный спином электрона, и их суперпозиция (10), т.е. квазиквант. Этот квазиквант и измерили в 1961 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов В.Д. Магнитный поток и его квантование // *Известия Уфимского научного центра РАН*. 2020. № 4. С. 25–28.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики: в 5 т. Атомная и ядерная физика. М.: Физматлит, 2002. Т. 5. 784 с.
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.
4. Попов И.П. Трииндуктивный осциллятор // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 1 (13). С. 50–55.
5. Павлов В.Д. Противоречия математических моделей атомов гелия и позитрония // *Инженерная физика*. 2024. № 9. С. 45–48.

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. Интерпретация результатов измерения кванта магнитного потока // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 1 (25). С. 61–67.

INTERPRETATION OF MAGNETIC FLUX QUANTUM MEASUREMENT RESULTS

V.D. Pavlov

Vladimir Electromechanical Plant (Vladimir)

Abstract. A quantum of kinetic momentum is attributed to a two-particle system of correlated electrons. As a result, the minimum possible magnetic flux (quantum) became smaller (twice) than the flux calculated for a single electron. There is an obvious contradiction, since magnetic flux is an additive quantity and therefore it would be more natural to expect its increase rather than decrease. The aim of the study is to resolve this contradiction. The possibility of creating a magnetic flux by a two-particle system of electrons and measuring it is not exclusive. Magnetic flux can be created by a single electron with the same success. Just as in the case of pair correlation the quantum of magnetic flux decreased twofold compared to F. London's quantum, in the case of n -fold correlation the quantum will decrease n times. There is no reasonable explanation for this. Ascribing a quantum of kinetic momentum to a Cooper pair is unacceptable. A quantum of kinetic momentum should be attributed to a single particle, and should not be attributed to a system of particles.

Keywords: quantum structure, correlated electrons, conductor, mean free path, kinetic moment, magnetic flux.

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. Interpretation of magnetic flux quantum measurement results // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 1 (25), pp. 61–67.

УДК 537.611

**МАГНИТНЫЙ ЗАРЯД. ОСЕВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПРОВОДНИКОВ С ТОКАМИ**

И.П. Попов

Курганский государственный университет (г. Курган)

© Попов И.П., 2025

Аннотация. В статье отмечено, что сила полевого взаимодействия двух точечных не векторных объектов (гравитационная или электростатическая) зависит от величины зарядов, под которыми понимается масса или электрический заряд. При этом проблем с определением напряженности поля путем деления силы на заряд не возникает, поскольку эта операция не затрагивает векторы. Показано, что иначе обстоит дело с магнитным взаимодействием. При попытке определения напряженности путем исключения из формулы для силы векторной величины возникает проблема с оставшимися двумя векторами, состоящая в том, что они не могут взаимодействовать друг с другом (образовывать векторное или скалярное произведение). Обозначено, что классическая схема исключает какие-либо трудности при определении магнитных зарядов и монополей. Установлено, что, кроме взаимодействия между параллельными проводниками с токами, существует осевое взаимодействие.

Ключевые слова: скрытые и комбинированные векторы, поле, монополь, заряд, сила, напряженность.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-67-73

ВВЕДЕНИЕ

Сила полевого взаимодействия двух точечных не векторных объектов (гравитационная или электростатическая) определяется выражением

$$d\mathbf{F}_{12} = k \frac{g_1 g_2}{4\pi r^3} \mathbf{r}_{12}, \quad (1)$$

где g – масса или электрический заряд [1–3]. При этом проблем с определением напряженности поля путем деления величины (1) на g_1 или g_2 не возникает, поскольку эта операция не затрагивает векторы.

Иначе обстоит дело с магнитным взаимодействием. Далее будет показано, что эта сила определяется формулой

$$d\mathbf{F}_{12} = -d\mathbf{F}_{21} = -\frac{\mu_0 \mu_1 \mu_2}{4\pi r^3} (d\mathbf{l}_1, d\mathbf{l}_2) \mathbf{r}_{12}. \quad (2)$$

При попытке определения напряженности путем исключения из формулы (2), например, величины $I_2 d\mathbf{l}_2$ возникает проблема с оставшимися двумя векторами. Эта проблема заключается в том, что $I_1 d\mathbf{l}_1$ не может взаимодействовать с вектором $\mathbf{r}$ (образовывать векторное или скалярное произведение), потому что в действительности он «занят» – в соответствии с выражением (2) он образует скалярное произведение с $I_2 d\mathbf{l}_2$.

П.-С. Лаплас не увидел этой проблемы. По существу он исключил из формулы $I_2 d\mathbf{l}_2$, а $I_1 d\mathbf{l}_1$ связал с $\mathbf{r}$ операцией векторного произведения. Неправомерность и произвол этого решения не только ошибочны сами по себе, но и породили существующие противоречия электродинамики (в частности, нарушение третьего закона Ньютона).

Проблема решается использованием *скрытых векторов*:

$$\{\mathbf{p}\} = \{\mathbf{i}p_x + \mathbf{j}p_y + \mathbf{k}p_z\}.$$

Скрытый вектор не имеет явного направления подобно вектору. В этом смысле он похож на скаляр. В то же время он несет сведения о содержащемся в нем векторе, в том числе о его направлении. В какой-то мере его можно рассматривать как законсервированный вектор. Вектор, скрытый вектор и скаляр не складываются.

Скрытый вектор можно умножать на скаляр и на вектор. В последнем случае имеет место *комбинированный вектор*:

$$\mathbf{b}_u^{\{\mathbf{p}\}} = b \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} \frac{\mathbf{u}}{u}.$$

Верхний и нижний индексы включают сведения о скрытом векторе и векторе соответственно.

При умножении скрытого вектора и вектора первый неотличим от скаляра.

Использование скрытого вектора позволяет представить напряженность магнитного поля путем преобразования формулы (2) следующим образом:

$$d\mathbf{H}_r^{\{Id\mathbf{l}\}} = -\frac{\mu_0 \mu}{4\pi r^3} \{Id\mathbf{l}\} \mathbf{r}.$$

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Особенности скрытых векторов. Некоторые формулы

$$|\mathbf{e}_u^{\{\mathbf{p}\}}| = e.$$

$$\mathbf{u}_u^{\{\mathbf{p}\}} = \mathbf{u}^{\{\mathbf{p}\}} = \mathbf{u} \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\}.$$

$$\mathbf{p}_u^{\{\mathbf{p}\}} = \{\mathbf{p}\} \frac{\mathbf{u}}{u}.$$

$$e\{\mathbf{p}\} = \{e\mathbf{p}\}.$$

К скрытым векторам применяются все векторные операции.

Скрытый вектор подобно скаляру можно алгебраически умножать на вектор.

В операциях с комбинированными векторами следует применять комбинированные знаки операций: « $\{\cdot\} \cdot$ », « $\{\cdot\} \times$ », « $\{\times\} \cdot$ », « $\{\times\} \times$ », « $\{+\} +$ », « $\{\times\} +$ », « $\{+\} \times$ », « $\{\cdot\} +$ », « $\{+\} \cdot$ ».

Знак в фигурных скобках касается скрытых векторов. Другой знак относится к векторам. Если комбинированный вектор умножается на скрытый вектор, фигурные скобки можно не применять.

Фигурные скобки могут быть аннулированы вторыми фигурными скобками $\{e\{\mathbf{p}\}\} = e\mathbf{p}$.

При наличии векторной составляющей $\mathbf{u}$ комбинированного вектора фигурные скобки аннулировать нельзя, кроме случаев, когда выражение в фигурных скобках превращается в скаляр, например:

$$\mathbf{p}_u^{\{\mathbf{p}\}} \{\cdot\} + \mathbf{q}_v^{\{\mathbf{q}\}} = \{\mathbf{p}\} \frac{\mathbf{u}}{u} \{\cdot\} + \{\mathbf{q}\} \frac{\mathbf{v}}{v} = \{\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}\} \left(\frac{\mathbf{u}}{u} + \frac{\mathbf{v}}{v} \right) = pq \cos(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \left(\frac{\mathbf{u}}{u} + \frac{\mathbf{v}}{v} \right).$$

Аннулирование фигурных скобок не должно приводить к тому, чтобы одна часть равенства была векторной, а другая скалярной.

$$\mathbf{e}_u^{\{\mathbf{p}\}} + \mathbf{b}_v^{\{\mathbf{p}\}} = e \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} \frac{\mathbf{u}}{u} + b \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} \frac{\mathbf{v}}{v} = \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} \left(e \frac{\mathbf{u}}{u} + b \frac{\mathbf{v}}{v} \right) = \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} \mathbf{c} = \mathbf{c}^{\{\mathbf{p}\}}.$$

$$\mathbf{e}_u^{\{\mathbf{p}\}} + \mathbf{b}_u^{\{\mathbf{q}\}} = e \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} \frac{\mathbf{u}}{u} + b \left\{ \frac{\mathbf{q}}{q} \right\} \frac{\mathbf{u}}{u} = \frac{\mathbf{u}}{u} \left\{ e \frac{\mathbf{p}}{p} + b \frac{\mathbf{q}}{q} \right\} = \frac{\mathbf{u}}{u} \{\mathbf{c}\} = c \left\{ \frac{\mathbf{c}}{c} \right\} \frac{\mathbf{u}}{u} = \mathbf{c}_u^{\{\mathbf{c}\}}.$$

$$\mathbf{e}^{\{\mathbf{p}\}} + \mathbf{e}^{\{\mathbf{q}\}} = \mathbf{e} \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} + \mathbf{e} \left\{ \frac{\mathbf{q}}{q} \right\} = \mathbf{e} \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} + \frac{\mathbf{q}}{q} \right\} = \mathbf{e} \{\mathbf{r}\} = \mathbf{e}^{\{\mathbf{r}\}}.$$

$$\{\mathbf{p}\} + \{\mathbf{q}\} = \{\mathbf{q}\} + \{\mathbf{p}\} = \{\mathbf{p} + \mathbf{q}\}.$$

$$\mathbf{e}_u^{\{\mathbf{p}\}} \cdot \mathbf{b}^{\{\mathbf{q}\}} = e \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} \frac{\mathbf{u}}{u} \cdot b \left\{ \frac{\mathbf{q}}{q} \right\} = eb \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \cdot \frac{\mathbf{q}}{q} \right\} \frac{\mathbf{u}}{u} = eb \left(\frac{\mathbf{p}}{p} \cdot \frac{\mathbf{q}}{q} \right) \frac{\mathbf{u}}{u} = c \frac{\mathbf{u}}{u} = \mathbf{c}_u.$$

$$\{\mathbf{p}\} \cdot \{\mathbf{q}\} = \{\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}\} = \mathbf{p} \cdot \mathbf{q}.$$

$$\mathbf{e}_u^{\{\mathbf{p}\}} \times \mathbf{b}^{\{\mathbf{q}\}} = e \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} \frac{\mathbf{u}}{u} \times b \left\{ \frac{\mathbf{q}}{q} \right\} = eb \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \times \frac{\mathbf{q}}{q} \right\} \frac{\mathbf{u}}{u} = \mathbf{c}_u^{\{\mathbf{r}\}}.$$

$$\{\mathbf{p}\} \times \{\mathbf{q}\} = \{\mathbf{p} \times \mathbf{q}\}.$$

$$\mathbf{e}_u^{\{\mathbf{p}\}} \times \mathbf{b}^{\{\mathbf{p}\}} = 0.$$

$$\{\nabla\} e = \left\{ \mathbf{i} \frac{\partial e}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial e}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial e}{\partial z} \right\}.$$

$$\{\nabla\} \cdot \{\mathbf{p}\} = \left\{ \frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{\partial p_y}{\partial y} + \frac{\partial p_z}{\partial z} \right\} = \frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{\partial p_y}{\partial y} + \frac{\partial p_z}{\partial z} = \nabla \cdot \mathbf{p}.$$

$$\{\nabla\} \times \{\mathbf{p}\} = \{\nabla \times \mathbf{p}\}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Классическая и лапласова схемы

Исторически теория силового поля (гравитационного или электростатического) строилась по следующей схеме:

1. Определяли два монополя (массивные или заряженные тела), обладающие соответствующими зарядами (массами или электрическими зарядами) и имеющие, что важно, *одинаковую* (причем *простейшую*) форму [4–6].

2. Находили силу взаимодействия между монополями [7–10].

3. Определяли напряженность поля одного из монополей как силу его взаимодействия с монополем, обладающим единичным зарядом.

4. Находили другие параметры поля: энергию, потенциал, индукцию и т.д.

Вопрос установления монополя и заряда в этом случае не возникает, поскольку они являются *первичными* и определяющими объектами при построении теории этого поля (другими словами, они определены изначально).

Если построить теорию поля (гравитационного или электростатического), рассматривая взаимодействие *неодинаковых* по форме объектов (например, цилиндра и тора), то, во-первых, математическая модель поля существенно исказится, а во-вторых, вопрос с установлением монополя станет по меньшей мере двусмысленным.

Приведенных рассуждений практически достаточно, чтобы говорить о бесплодности попыток в рамках существующей теории магнитного поля найти магнитный монополь и заряд.

Если построить теорию магнитного поля по приведенной выше *классической* схеме, то проблем с магнитными монополями и зарядом не возникнет по той же причине, по которой они не возникают для теорий гравитационного и электростатического полей.

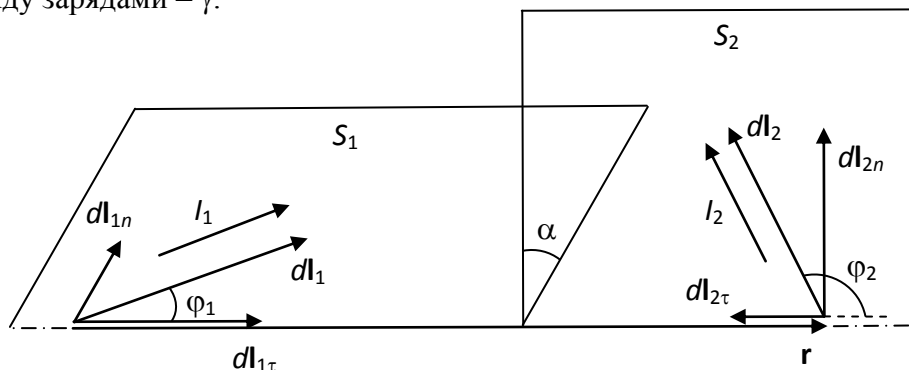
В отличие от Лапласа, который в основу построения теории магнитного поля положил взаимодействие объектов с формой цилиндра (линейный проводник с током) и тора (эквивалентный круговой ток магнита), следует в соответствии с п. 1 классической схемы в качестве *монополей* определить *одинаковые* и *элементарные* объекты, для чего подойдут бесконечно малые элементы проводников с токами, а в качестве *магнитных зарядов* – величины $I_1 d\mathbf{l}_1$ и $I_2 d\mathbf{l}_2$.

Для того чтобы отличать классическую схему построения теории от схемы Лапласа, первую в дальнейшем так и будем называть классической, а вторую – лапласовой.

Следующей задачей (в соответствии с п. 2 классической схемы) является определение силы взаимодействия между магнитными монополями.

Экспериментально подкрепленные данные

Пусть магнитный заряд $I_1 d\mathbf{l}_1$ лежит в плоскости S_1 , а магнитный заряд $I_2 d\mathbf{l}_2$ – в плоскости S_2 (рисунок). Угол между плоскостями – α . Ориентация магнитных зарядов произвольная. Заряды можно разложить на поперечные $I_1 d\mathbf{l}_{1n}$, $I_2 d\mathbf{l}_{2n}$ и продольные $I_1 d\mathbf{l}_{1\tau}$, $I_2 d\mathbf{l}_{2\tau}$ составляющие относительно радиус-вектора $\mathbf{r}$, лежащего на пересечении плоскостей. Угол между зарядами – γ .



Магнитные заряды $I_1 d\mathbf{l}_1$ и $I_2 d\mathbf{l}_2$

Проводились многочисленные эксперименты по определению силы взаимодействия между *параллельными* проводниками с током [11]. Специфика этих экспериментов *не вызывает* сомнений в *достоверности* их результатов. В соответствии с этими результатами для рассматриваемых магнитных зарядов

$$dF_n = -\mu_0 \mu \frac{I_1 dl_{1n} I_2 dl_{2n}}{4\pi r^2} \cos \alpha.$$

Велись многочисленные эксперименты и по определению силы взаимодействия между *соосными* проводниками с током [11]. Специфика этих экспериментов *вызывает* сомнения в *точности* их результатов, поскольку каждый из соосных проводников входит в состав замкнутого контура, поперечные составляющие которого существенно влияют на измерения. В соответствии с этими результатами для рассматриваемых магнитных зарядов

$$dF_\tau = -k_\tau \mu_0 \mu \frac{I_1 dl_{1\tau} I_2 dl_{2\tau}}{4\pi r^2},$$

где k_τ – коэффициент, нуждающийся в уточнении.

Осевое взаимодействие

Если соосные проводники с токами не взаимодействуют, то для них должно выполняться тождество

$$\int_{-\infty}^0 F dr = A = W_0 - W_\infty \equiv 0,$$

где A – работа; W – энергия суммарного поля обоих проводников. Это легко проверить.

При условии $d\mathbf{l}_1 = d\mathbf{l}_2 = d\mathbf{l}$, $I_1 = -I_2$ и $r = \infty$

$$W_\infty = 2\mu_0 \mu \int_V \frac{H^2}{2} dV \neq 0,$$

где H – напряженность поля одного проводника. При $r = 0$

$$W_0 = 0 \text{ и } W_0 - W_\infty \neq 0.$$

Это означает, что соосные проводники с токами взаимодействуют с силой

$$F = \frac{dW}{dr}.$$

Здесь и в дальнейшем, если не оговаривается иное, токи I_1 и I_2 считаются стабилизированными.

Лапласова теория, исключая притяжение или отталкивание соосных проводников с токами, является следствием опытов Ж.-Б. Био и Ф. Савара. Важно, таким образом, установить, зафиксировано ли в этих опытах отсутствие осевого взаимодействия.

В действительности оно не могло быть зафиксировано в принципе, поскольку в этих опытах взаимодействие проводников вообще не изучалось. В них исследовалось влияние магнита на проводник, в результате которого была получена формула

$$F = \frac{mI dl}{r^2} \sin \varphi,$$

где m – магнитная масса. Данная формула не дает информации об осевом взаимодействии проводников.

При размещении магнита на оси элемента $I d\mathbf{l}$ его (магнита) равноценный круговой ток имеет две равные, но противоположные и продольные по отношению к элементу составляющие, каждая из которых взаимодействует с элементом. Магнит, таким образом,

одновременно притягивается и отталкивается, а суммарная сила равна нулю. Следовательно, осевое взаимодействие опытами Био и Савара не опровергается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы было установлено следующее:

описание магнитного взаимодействия не соответствует классической схеме описания полевого взаимодействия;

введение в рассмотрение скрытых и комбинированных векторов создает возможность применения классической схемы для магнитостатики;

классическая схема исключает какие-либо трудности при определении магнитных зарядов и монополей;

кроме взаимодействия между параллельными проводниками с токами, существует осевое взаимодействие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Popov I.P. Full Account of the Energy of the Gravitational Field in Cosmology and Spacecraft Ballistics // *Technical Physics*. 2024. V. 69. No. 1. P. 53–56.
2. 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.
3. 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.
4. Попов И.П. Расчет полной энергии электростатического поля // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2020. Т. 2 № 392. С. 107–114.
5. Попов И.П. Запасаемая электростатическая энергия // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2020. № 33. С. 195–210.
6. Попов И.П. Об энергии электростатического поля // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2020. № 1 (38). С. 35–41. DOI 10.22314/2658-4859-2020-67-1-35-41
7. Попов И.П. Постоянная интегрирования энергии электростатического поля // *Вестник Псковского государственного университета. Естественные и физико-математические науки*. 2021. Вып. 17. С. 108–120.
8. Попов И.П. О некоторых расчетах энергии электростатического поля // *Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах*. 2020. Т. 8. № 1. С. 2–9.
9. Попов И.П. Энергия электростатического поля заряженных непроводящих шаров // *Вестник Таганрогского института им. А.П. Чехова*. 2021. № 2. С. 27–35.
10. Попов И.П. Применение методов классической механики к электрическим зарядам // *Труды МАИ*. 2021. № 119. URL: <http://mai.ru/> (дата обращения: 23.01.2025).
11. Ампер А.М. Электродинамика. М.: АН СССР, 1954. 492 с.

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. Магнитный заряд. Осевое взаимодействие проводников с токами // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 1 (25). С. 67–73.

**MAGNETIC CHARGE. AXIAL INTERACTION
OF CONDUCTORS WITH CURRENTS**

I.P. Popov

Kurgan State University (Kurgan)

Abstract. The article notes that the force of field interaction between two point non-vector objects (gravitational or electrostatic) depends on the magnitude of charges, which are understood as mass or electric charge. In this case, there are no problems with determining the field strength by dividing the force by the charge, since this operation does not affect vectors. It is shown that the situation is different with magnetic interaction. When trying to determine the strength by excluding the vector quantity from the formula for force, a problem arises with the remaining two vectors, which consists in the fact that they cannot interact with each other (form a vector or scalar product). It is noted that the classical scheme excludes any difficulties in determining magnetic charges and monopoles. It is established that in addition to the interaction between parallel conductors with currents there is an axial interaction.

Keywords: hidden and combined vectors, field, monopole, charge, force, tension.

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. Magnetic charge. Axial interaction of conductors with currents // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 1 (25), pp. 67–73.

УДК 629.7.052

**ТЕОРЕМА О ЛИНИЯХ n -СИММЕТРИИ
ВЫПУКЛОЙ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ****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., 2025

Аннотация. Рассмотрено понятие момента n -го порядка плоской пластины относительно заданной прямой. Прямая является линией n -симметрии в том случае, если моменты n -го порядка двух подпластин, на которые исходная пластина делится этой прямой, одинаковы. Установлено, что момент n -го порядка выпуклой плоской пластины относительно прямой L , проводимой параллельно данной прямой, достигает наименьшего значения тогда, когда прямая L представляет собой линию $(n-1)$ -симметрии пластины.

Ключевые слова: момент n -го порядка, линия n -симметрии, линия полумасс, линия равновесия, выпуклая плоская пластина, функция плотности, масса, центр масс, электрическая машина.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-74-81**ВВЕДЕНИЕ**

В специальной литературе описан большой спектр разнообразных технологий и методов механической и физико-технической обработки деталей машин (см., например, работы [1–13]). Чтобы выбрать из этого длинного списка подходящие к данному случаю методы и технологии, определяющие процесс изготовления или балансировки детали электрической машины, требуется учет распределения массы внутри рассматриваемой детали. Поскольку распределение массы внутри детали определяется соответствующей функцией плотности, то может представлять интерес изучение свойств функции плотности, в том числе 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 статьях [14–17, 20] рассматривались плоские детали (*пластины*), соответствующая функция плотности представляла собой функцию двух переменных. В статьях [18, 19] в качестве деталей рассматривались уже пространственные тела, функция плотности в этом случае являлась функцией трех переменных. В настоящей работе продолжаются исследования плоских пластин, и данная статья посвящена вопросам симметрии функции плотности, зависящей от двух переменных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБОСНОВАНИЯ

Рассматривается плоскость вместе с заданной на ней прямоугольной декартовой системой координат. Под *областью* понимается часть плоскости, ограниченная замкнутой линией без самопересечений (при этом граница области считается частью области, потому

всякая область *замкнута*). Точки области, не лежащие на ее границе, являются *внутренними* точками этой области. Область называется *выпуклой*, если всякая прямая, проведенная через любую ее внутреннюю точку, пересекает границу этой области ровно в двух точках. Область S_1 является *подобластью* области S , если $S_1 \subseteq S$. Область S вместе с определенной в этой области непрерывной неотрицательной функцией двух переменных $f(x, y)$ представляет собой *пластину* D , при этом функция $f(x, y)$ определяет *плотность* пластины D (являясь, таким образом, функцией точки пластины). Подобласть области S вместе с соответствующим ограничением функции $f(x, y)$ называется *подпластиной* пластины D .

Пластина D является *выпуклой*, если соответствующая область S выпукла. Отметим, что в рамках данной статьи рассматриваются в первую очередь выпуклые пластины.

Пусть имеются (так, как это показано на рис. 1) прямая L и пластина D с областью S и функцией плотности $f(x, y)$. В соответствии с определениями из статьи [16] *моментом n -го порядка пластины D относительно прямой L* называется

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

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

Некоторые частные случаи этого определения заслуживают отдельного рассмотрения.

Момент нулевого порядка пластины D не зависит от положения прямой L и равен *массе* пластины D : $M_0(D) = \iint_S (r(x, y))^0 f(x, y) dx dy = \iint_S f(x, y) dx dy = m(D)$. Заметим, что функция плотности $f(x, y)$ определением объявлена неотрицательной, а значит, в некоторых точках области S она может обращаться в ноль. Однако следует иметь в виду, что в настоящей статье (как и в статье [16]) предполагается выполненным обязательное дополнительное условие: для любой пластины D масса самой пластины D и масса любой ее подпластины больше нуля.

Момент первого порядка пластины D относительно прямой L представляет собой *статический момент* пластины D относительно прямой L в смысле традиционного определения [23]: $M_1(D) = \iint_S r(x, y) f(x, y) dx dy$.

Момент второго порядка пластины D относительно прямой L представляет собой *момент инерции* пластины D относительно прямой L в смысле традиционного определения [23]: $M_2(D) = \iint_S (r(x, y))^2 f(x, y) dx dy$.

Пусть теперь прямая L делит пластину D на две подпластины D_1 и D_2 с областями соответственно S_1 и S_2 так, как это показано на рис. 2. В соответствии с определениями, рассмотренными в работе [16], прямая L является *линией n -симметрии пластины D* , если $M_n(D_1) = M_n(D_2)$. Таким образом, прямая линия представляет собой *линию n -симметрии*

пластины, если она делит ее на две подпластины так, что моменты n -го порядка этих подпластин относительно данной прямой одинаковы.

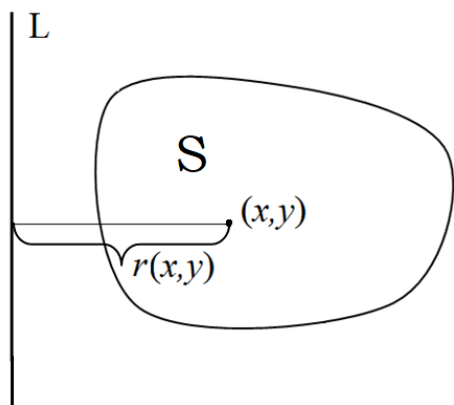


Рис. 1. Момент относительно прямой

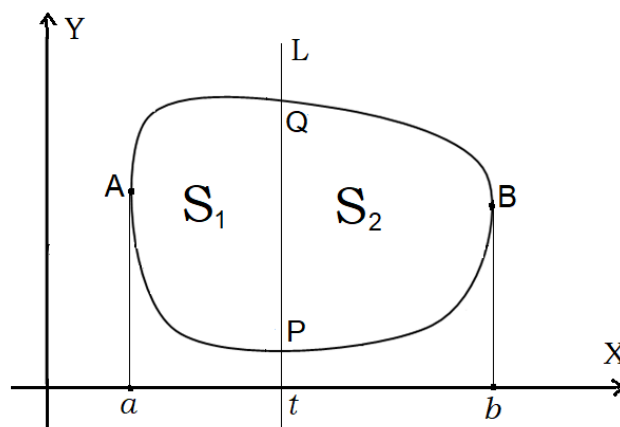


Рис. 2. Область S и прямая L

Как отмечено в статье [16], линии 0-симметрии пластины (делящие ее на подпластины одинаковой массы) представляют собой *линии полумасс*, а линии 1-симметрии (делящие ее на подпластины с равными статическими моментами) представляют собой *линии равновесия* (это название оправдано тем, что пластина, положенная на лезвие бритвы вдоль такой прямой, сохранит равновесие). Линии 2-симметрии пластины – это прямые, которые делят пластину на две подпластины с равными моментами инерции. Кроме того, точка пересечения всех линий n -симметрии пластины является *центром n -симметрии данной пластины*. Таким образом, центр 0-симметрии пластины оказывается ее *центром полумасс* (т.е. ее *центром s -симметрии*), а центр 1-симметрии пластины – ее *центром масс* (т.е. ее *центром c -симметрии*). Как было установлено в статье [14], центр 1-симметрии всегда существует, в то время как центр 0-симметрии может не существовать. Там же было показано, что в случае, когда существуют оба эти центра симметрии, они могут не совпадать.

В статье [16] было установлено, что для каждого целого неотрицательного числа n , любой пластины D и произвольно проведенной прямой существует единственная линия n -симметрии пластины D , параллельная заданной прямой. Цель настоящей работы – доказать, что справедлива нижеследующая теорема.

Теорема. Момент n -го порядка (при $n > 0$) выпуклой пластины D относительно прямой L , проводимой параллельно заданной прямой, достигает наименьшего значения тогда, когда прямая L представляет собой линию $(n-1)$ -симметрии пластины D .

Для доказательства теоремы понадобится техническая лемма, установленная в статье [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 прямая, параллельно которой проводится прямая L , есть ось OY заданной на плоскости прямоугольной декартовой системы координат. Пусть прямая L , разбивающая пластину D на две подпластины D_1 и D_2 и, соответственно, область S на две подобласти S_1 и S_2 , проходит через точку t на оси OX (так, как это показано на рис. 2). Тогда момент n -го порядка пластины D относительно прямой L может быть представлен следующим образом:

$$\begin{aligned} M_n(D) &= M_n(D_1) + M_n(D_2) = \iint_{S_1} (r(x, y))^n f(x, y) dx dy + \iint_{S_2} (r(x, y))^n f(x, y) dx dy = \\ &= \iint_{S_1} |x-t|^n f(x, y) dx dy + \iint_{S_2} |x-t|^n f(x, y) dx dy = \iint_{S_1} (t-x)^n f(x, y) dx dy + \iint_{S_2} (x-t)^n f(x, y) dx dy. \end{aligned}$$

Очевидно, $M_n(D)$ оказывается функцией, зависящей от переменной t :

$$M_n(D) = M_n(t).$$

Запишем эту функцию более подробно, предположив, что дуга APB задана уравнением $y = \varphi_1(x)$, а дуга AQB – уравнением $y = \varphi_2(x)$:

$$\begin{aligned} M_n(t) &= \iint_{S_1} (t-x)^n f(x, y) dx dy + \iint_{S_2} (x-t)^n f(x, y) dx dy = \\ &= \int_a^t dx \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} (t-x)^n f(x, y) dy + \int_t^b dx \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} (x-t)^n f(x, y) dy = \\ &= \int_a^t (t-x)^n dx \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} f(x, y) dy + \int_t^b (x-t)^n dx \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} f(x, y) dy = \int_a^t (t-x)^n F(x) dx + \int_t^b (x-t)^n F(x) dx, \end{aligned}$$

где $F(x) = \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} f(x, y) dy$ – функция, непрерывная на отрезке $[a; b]$.

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

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

Применяя лемму, доказанную в статье [22], получаем:

$$\begin{aligned} M_n'(t) &= n \int_a^t (t-x)^{n-1} F(x) dx + n \int_t^b (x-t)^{n-1} F(x) dx = n \int_a^t (t-x)^{n-1} F(x) dx - n \int_t^b (x-t)^{n-1} F(x) dx = \\ &= n \int_a^t (t-x)^{n-1} dx \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} f(x, y) dy - n \int_t^b (x-t)^{n-1} dx \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} f(x, y) dy = \\ &= n \iint_{S_1} (t-x)^{n-1} f(x, y) dx dy - n \iint_{S_2} (x-t)^{n-1} f(x, y) dx dy = nM_{n-1}(D_1) - nM_{n-1}(D_2). \end{aligned}$$

Теперь, приравнявая $M_n'(t)$ к нулю, находим, что экстремум функции $M_n(t)$ приходится на то положение прямой L , при котором $M_{n-1}(D_1) = M_{n-1}(D_2)$, а это значит, что прямая L является линией $(n-1)$ -симметрии пластины 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 из статьи [22]. Если $n > 1$, то

$$\begin{aligned} M_n''(t) &= \left(n \int_a^t (t-x)^{n-1} F(x) dx + n \int_b^t (x-t)^{n-1} F(x) dx \right)' = \\ &= n(n-1) \int_a^t (t-x)^{n-2} F(x) dx - n(n-1) \int_b^t (x-t)^{n-2} F(x) dx = \\ &= n(n-1) \int_a^t (t-x)^{n-2} F(x) dx + n(n-1) \int_t^b (x-t)^{n-2} F(x) dx = \\ &= n(n-1) \int_a^t (t-x)^{n-2} dx \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} f(x, y) dy + n(n-1) \int_t^b (x-t)^{n-2} dx \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} f(x, y) dy = \\ &= n(n-1) \iint_{S_1} (t-x)^{n-2} f(x, y) dx dy + n(n-1) \iint_{S_2} (x-t)^{n-2} f(x, y) dx dy = \\ &= n(n-1) M_{n-2}(D_1) + n(n-1) M_{n-2}(D_2). \end{aligned}$$

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

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

Функция $F(t)$ в силу своего определения неотрицательна на отрезке $[a; b]$ и притом может обращаться в ноль только в отдельных изолированных точках этого отрезка (последнее есть следствие того требования, что масса всякой подпластины пластины D должна быть больше нуля). Поскольку тем же свойством обладает и функция $M_1''(t)$, функция $M_1'(t)$ строго возрастает и обращается в ноль в единственной точке – 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

Линии n -симметрии плоской пластины D и ее моменты n -го порядка относительно прямой изучались ранее для частных значений n . Случай $n = 0$ связан с понятием s -симметрии, а случай $n = 1$ – с понятием c -симметрии. Рассматривался ранее также и случай $n = 2$, связанный с понятием момента инерции. Соответствующие исследования можно найти в статьях [14–16].

Переход к рассмотрению общих понятий n -симметрии при произвольном целом неотрицательном n , предложенный в статьях [16, 17, 20], позволил выявить такие связи между этими видами симметрии, которые не были отчетливо видны на описанных частных случаях. Теорема, доказанная в данной статье, представляет собой пример установления связи такого рода. При этом применение ее к известным ранее частным случаям оказывается также важным и полезным. Так, следствием данной теоремы являются следующие утверждения:

1) статический момент выпуклой пластины D относительно прямой L , проводимой параллельно заданной прямой, достигает наименьшего значения тогда, когда прямая L представляет собой линию полумасс пластины D ;

2) момент инерции выпуклой пластины D относительно прямой L , проводимой параллельно заданной прямой, достигает наименьшего значения тогда, когда прямая L представляет собой линию равновесия пластины D .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожжалова В.И., Седыхин Ф.В., Смоленцев В.П., Ямпольский В.М. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учебное пособие: в 2 т. 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. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1979. 487 с.
4. Дальский А.М., Гаврилюк В.С. Механическая обработка материалов: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1981. 266 с.
5. Немилов Е.Ф. Электроэрозионная обработка материалов: учебное пособие. 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 пресс-форм: методические рекомендации по проектированию. 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. Замечание о центрах s -симметрии и c -симметрии плоской пластины // *Вестник Тверского государственного технического*

университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 1 (9). С. 63–70.

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. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: в 3 т. М.: ФИЗ-МАТЛИТ, 2001. Т. 3. 662 с.

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 линиях n -симметрии выпуклой плоской пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 1 (25). С. 74–81.

**THE THEOREM ON THE n -SYMMETRY LINES
OF A CONVEX FLAT PLATE***Al.A. Shum¹, A.M. Vetoshkin²*¹ *Tver State Technical University (Tver)*² *Mytishchi filial of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman
(Mytishchi city, Moscow region)*

Abstract. The concept of the moment of the n -th order of a flat plate relative to a given straight line is considered. A straight line is a line of n -symmetry if the moments of the n -th order of the two sub-plates into which the original plate is divided by this line are the same. It is established that the moment of the n -th order of the convex flat plate relative to a straight line L , drawn parallel to a given straight line, reaches the smallest value when the straight line L is a line of $(n-1)$ -symmetry of this plate.

Keywords: moment of n -th order, line of n -symmetry, half-mass line, equilibrium line, convex flat plate, density function, mass, center of 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, Mytishchi filial of 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 theorem on the n -symmetry lines of a convex flat plate // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 1 (25), pp. 74–81.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 544.478.1

РУТЕНИЙСОДЕРЖАЩИЙ КАТАЛИЗАТОР ДЛЯ ГИДРИРОВАНИЯ ФРУКТОЗЫ

*М.Е. Григорьев, К.Э. Соловьев**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Григорьев М.Е., Соловьев К.Э., 2025

Аннотация. В статье приведены данные об использовании гетерогенных каталитических систем в процессе гидрирования фруктозы до полиолов – сорбита и маннита, имеющих большое промышленное значение. Представлены результаты кинетического тестирования синтезированного с помощью сверхсшитого полистирола марки MN100 рутенийсодержащего катализатора. Установлено, что он характеризуется высокой активностью в гидрировании фруктозы, способен проводить процесс гидрирования с практически 100%-й конверсией субстрата. Продуктами гидрирования служили только сорбит и маннит, выход маннита был немного ниже, чем сорбита, и составлял 47 %. Проведено сравнение катализатора 5%Ru/MN100 с коммерческим 5%Ru/C по конверсии фруктозы и выходу маннита. Показано, что используемый катализатор превосходит катализатор 5%Ru/C не только по активности, но и по выходу маннита.

Ключевые слова: гидрирование, рутений, носитель, катализатор, фруктоза, сорбит, маннит.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-82-87

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день большое число продуктов, используемых в химической промышленности, производится из возобновляемых источников сырья. Биомасса служит источником многих веществ, таких как пентоз, гексоз; из нее получают различные моно- и дисахариды, которые применяют для производства различных веществ [1].

Наиболее часто в промышленности применяют реакции окисления и гидрирования. Так, при гидрировании моно- и дисахаридов получают многоатомные спирты – полиолы, которые используются в пищевой и фармацевтической промышленности. При гидрировании глюкозы образуется сорбит, при гидрировании фруктозы – смесь сорбита и маннита. Маннит используют в производстве лекарственных средств в форме таблеток, в качестве диуретического средства, в косметологии, как подсластитель его применяют в пищевой промышленности (особенно в жевательных резинках), а также задействуют для получения спиртов, например пропандиола [2–4].

В гидрировании используются как гомогенные, так и гетерогенные катализаторы. Для гидрирования моно- и дисахаридов чаще всего применяют гетерогенные каталитические системы [5, 6]. Основными каталитическими металлами являются Ru, Ni [7]. Гидрогенизацию фруктозы проводят на рутениевых каталитических системах, а также

на никелевых, менее активных медных металлах и биметаллах. Схема каталитического гидрирования фруктозы представлена на рис. 1.

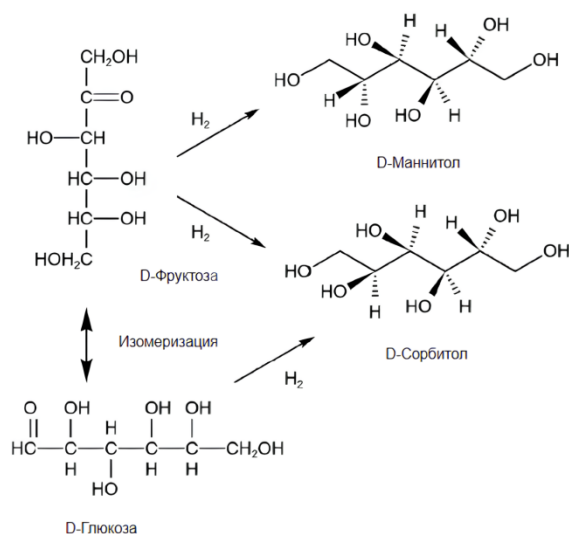


Рис. 1. Схема каталитического гидрирования фруктозы

Как видно из рис. 1, при гидрировании фруктозы происходит процесс не только гидрогенизации, но и изомеризации фруктозы в глюкозы, что приводит к получению сорбита. Для большего получения маннита используют субстрат с высоким содержанием фруктозы, например инулин. Получение маннита из фруктозы экономически более выгодно, чем из маннозы, поэтому актуальным является проведение процесса гидрогенизации фруктозы с высоким выходом маннита и большой скоростью. Существенное влияние на селективность по манниту оказывает выбор гетерогенной каталитической системы. Так, у никелевых катализаторов в процессе гидрирования проявляется значимый недостаток – вымывание активного никеля в раствор целевого продукта, из-за чего реакционный раствор загрязняется ионами тяжелого металла и, следовательно, требуется введение стадии очистки целевого продукта. Катализатор на основе нанесенной на подложку меди [8] способствует повышению селективности по манниту, но имеет небольшую активность, если сравнивать с часто используемыми катализаторами гидрирования на основе благородных металлов (например, рутениевыми).

Применение коммерческого рутениевого катализатора Ru/C показывает, что процесс гидрирования фруктозы идет с большой скоростью даже при низком давлении водорода (1 атм). Максимальная селективность по манниту достигает 43 % и не зависит от начальной концентрации фруктозы. Повышение в реакционной смеси маннита и сорбита сильно влияет на абсорбцию фруктозы на поверхности катализатора (по конкурентному механизму). Катализатор обладает большой стабильностью, на что указывает практически полное отсутствие выщелачивания каталитически активного рутения. Использование в качестве промотирующей добавки олова обеспечило повышение селективности по манниту, однако отрицательно сказалось на активности рутениевого катализатора и на его стабильности [8].

В настоящей работе использовали катализатор Ru/MN100 (носитель для каталитически активных частиц – MN100 (сверхсшитый полистирол (СПС), содержащий химически связанный азот)). Он был протестирован в реакции гидрирования фруктозы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Были задействованы следующие методы и способы проведения процесса гидрирования фруктозы:

1. Приготовление катализатора Ru/СПС MN100. Навеску $\text{Ru}(\text{OH})\text{Cl}_3$ растворяли в смеси растворителей, состоящей из тетрагидрофурана и воды. Образовавшийся раствор при интенсивном перемешивании добавляли к СПС MN100. Полученный материал сушили под вакуумом при температуре около 100 °С. После этого высушенный катализатор кипятили в небольшом количестве NaOH. Затем к суспензии добавляли небольшое количество раствора перекиси водорода при непрерывном перемешивании и отделяли катализатор фильтрованием с последующей отмывкой водой до нейтрального pH и сушкой. Таким образом был синтезирован 3 % (масс.) рутениевый катализатор. Восстановление полученного катализатора проводилось в токе водорода. Установка для восстановления включает рубашку и стеклянную трубу, к которой подсоединены гибкий шланг для подачи водорода и азотная магистраль. Навеску катализатора, предварительно завернутую в стекловолокно, помещали в трубу, трубу – в установку, подсоединив к одному концу трубки шланг для подачи водорода, а второй конец трубки присоединяли к гидрозатвору. После этого катализатор продували небольшим количеством азота, затем оставляли его под слабым током азота и включали нагрев. По достижении температуры 300 °С подачу азота прекращали и включали подачу водорода. Восстановление длилось 2 ч. По истечении этого времени осуществляли охлаждение катализатора в токе водорода. Далее его продували азотом.

2. Гидрирование фруктозы в периодическом реакторе. Навеску катализатора вносили через боковой штуцер в автоклав, воду объемом $35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ подавали через загрузочную камеру при поднятой запорной игле так, чтобы она попала в рабочую полость реактора. Раствор субстрата заливали в загрузочную камеру при опущенной запорной игле. Общий объем жидкой фракции составил $50 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Реактор герметизировали и трехкратно продували водородом. Давление водорода в системе доводили до рабочего. Нагревали автоклав с помощью термостата до необходимой температуры. Образовавшийся избыток водорода осторожно стравливали. Затем путем встряхивания в течение 30 мин при заданной температуре осуществляли насыщение катализатора водородом. По истечении указанного времени встряхивание прекращали, раствор субстрата из загрузочной камеры путем поднятия запорной иглы вводили в автоклав и вновь включали перемешивание. В процессе гидрирования проводили отбор проб катализата на анализ через определенные промежутки времени.

3. Анализ катализата на фруктозу и полиолы с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии. Для этого использовали рефрактометрический детектор. Разделение катализата на фракции осуществлялось с помощью колонки ReproGel H (500 × 10 мм, число теоретических тарелок 160 000).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кинетическое тестирование катализатора проводилось при следующих условиях: парциальное давление водорода – 30 атм, температура – 373 К, масса катализатора – 0,05 г, начальная концентрация водного раствора фруктозы – 0,11 моль/л, катализатор –

5%Ru/MN100 с теоретическим массовым содержанием рутения 5 %. На основании экспериментальных данных была построена конверсионная кривая (рис. 2).

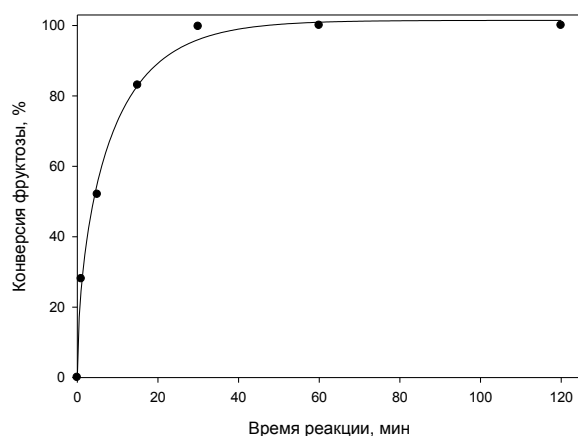


Рис. 2. Конверсионная кривая гидрирования фруктозы

Как видно из рис. 2, при увеличении времени реакции происходит повышение конверсии фруктозы, что типично для большинства реакций гидрирования. По истечении 30 мин от начала реакции наблюдается практически полное израсходование субстрата, что показывает высокое значение конверсии фруктозы (около 100 %). При каталитическом гидрировании фруктозы получается смесь двух полиолов – сорбита и маннита, которые имеют большое значение в области промышленного применения. Выход сорбита и маннита показан на рис. 3.

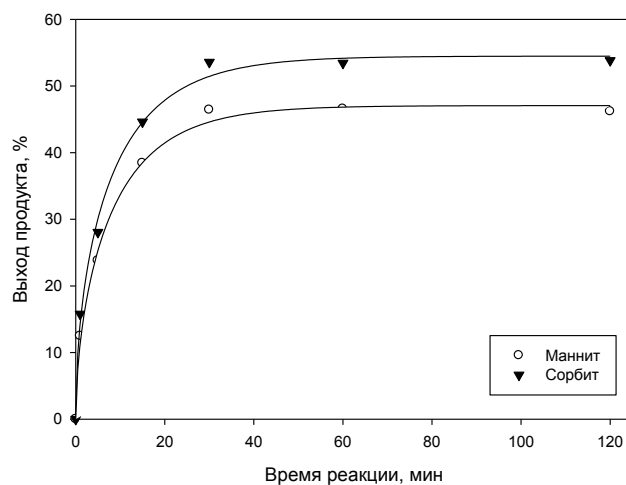


Рис. 3. Зависимость выхода сорбита и маннита от времени реакции гидрирования фруктозы

На рис. 3 показано, что с увеличением времени реакции происходит повышение выхода полиолов, максимальные значения выхода маннита и сорбита при условиях проведения эксперимента достигаются через 30 мин после начала реакции и остаются

постоянными. Выход сорбита незначительно превышает выход маннита, что, скорее всего, свидетельствует о большей скорости гидрирования фруктозы в сорбит, чем в маннит.

Сравнение полученных экспериментальных данных с результатами, приведенными в статье [8], показывают, что при использовании коммерческого катализатора 5%Ru/C время достижения практически полной конверсии фруктозы при тех же самых условиях, которые указаны в настоящей статье, составляет более 80 мин. Это значит, что активность синтезированного катализатора 5%Ru/MN100 выше, чем катализатора 5%Ru/C. Авторы статьи [8] указывают, что селективность по манниту варьируется от 40 % (при 100 °C и 100 атм водорода) до 43 % (при 72 °C и 1 атм водорода), остальным продуктом был сорбит. Использование катализатора 5%Ru/MN100 позволило добиться 47 % выхода маннита при практически полной конверсии фруктозы, что выше в сравнении с катализатором 5%Ru/C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированный с использованием свёрхсшитого полистирола марки MN100 катализатор 5%Ru/MN100 показал высокую активность в процессе гидрирования фруктозы до сорбита и маннита. Данная каталитическая система способна обеспечивать практически 100%-ю конверсию фруктозы за 30 мин с момента начала реакции. Выход маннита при этом составляет 47 %, что является более высоким показателем, если сравнивать с применением в аналогичных условиях коммерческого катализатора 5%Ru/C. Таким образом, 5%Ru/MN100 – это эффективный катализатор гидрирования фруктозы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climent M.J., Corma A., Iborra S. Converting Carbohydrates to Bulk Chemicals and Fine Chemicals over Heterogeneous Catalysts // *Green Chem.* 2011. P. 520–540.
2. Characterization of Mannitol Producing strains of *Leuconostoc* species / Patra F. [et al.] // *World J Microbiol Biotechnol.* 2011. No. 27. P. 933–939.
3. Rapoport SI, Advances in Osmotic Opening of the Blood-brain Barrier to Enhance CNS Chemotherapy // *Expert Opinion on Investigational Drugs.* 2001. No. 10. P. 1809–1818.
4. Zhao L., Zhou J.H., Sui Z.J., Zhou X.G. 2010. Hydrogenolysis of Sorbitol to Glycols Over Carbon Nanofiber Supported Ruthenium Catalyst // *Chemical Engineering Science.* 2010. No. 65, P. 30–35.
5. Zelin J., Regenhardt S.A., Meyer C.L., Duarte H.A., Sebastian V., Marchi A.J., Selective Aqueous-phase Hydrogenation of D-fructose into D-mannitol Using a Highly Efficient and Reusable Cu-Ni/SiO₂ Catalyst // *Chemical Engineering Science.* 2019. No. 206. P. 315–326.
6. Godswill A.C. Sugar Alcohols: Chemistry, Production, Health Concerns and Nutritional Importance of Mannitol, Sorbitol, Xylitol, and Erythritol // *International Journal of Advanced Research.* 2017. No. 3. P. 31–66.
7. Toukoniitty B., Kuusisto J., Mikkola J.P., Salmi T., Murzin D.Y. Effect of Ultrasound on Catalytic Hydrogenation of D-fructose to D-mannitol // *Industrial & Engineering Chemistry Research.* 2015. No. 44. P. 9370–9375.
8. Heinen A.W., Peters J.A., van Bekkum H. Hydrogenation of Fructose on Ru/C Catalysts // *Carbohydr Res.* 2000. No. 328 (4). P. 449–457.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГРИГОРЬЕВ Максим Евгеньевич – 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: GE.Max2015@yandex.ru

СОЛОВЬЕВ Кирилл Эдуардович – магистр, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: Kirill050499@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Григорьев М.Е., Соловьев К.Э. Рутенийсодержащий катализатор для гидрирования фруктозы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 1 (25). С. 82–87.

RUTHENIUM-CONTAINING CATALYST FOR FRUCTOSE HYDROGENATION

M.E. Grigoriev, K.E. Solovyov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article presents data on the use of heterogeneous catalytic systems in the process of fructose hydrogenation to polyols – sorbitol and mannitol, which are of great industrial importance. The results of kinetic testing of a ruthenium-containing catalyst synthesized using hyper-crosslinked polystyrene grade MN100 are presented. It was found that it is characterized by high activity in fructose hydrogenation, capable of carrying out the hydrogenation process with almost 100 % substrate conversion. The hydrogenation products were only sorbitol and mannitol, the yield of mannitol was slightly lower than sorbitol and amounted to 47 %. A comparison of the 5% Ru/MN100 catalyst with the commercial 5 % Ru/C in terms of fructose conversion and mannitol yield was carried out. It is shown that the catalyst used in the article exceeds 5 % Ru/C not only in activity, but also in mannitol yield.

Keywords: hydrogenation, ruthenium, carrier, catalyst, fructose, sorbitol, mannitol.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

GRIGOREV Maksim Evgenievich – 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: GE.Max2015@yandex.ru

SOLOVYOV Kirill Eduardovich – Master's student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: Kirill050499@gmail.com

CITATION FOR AN ARTICLE

Grigoriev M.E., Solovyov K.E. Ruthenium-containing catalyst for fructose hydrogenation // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 1 (25), pp. 82–87.

УДК 54.057

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТИОНАТА КАЛЬЦИЯ*А.И. Петрова, Д.Ю. Цветков, Н.В. Лакина, В.Ю. Долуда, А.И. Сидоров**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Петрова А.И., Цветков Д.Ю., Лакина Н.В.,
Долуда В.Ю., Сидоров А.И., 2025

Аннотация. Метионин входит в состав белков и пептидов. Кормовая добавка на основе метионина предназначена для улучшения роста и продуктивности крупного рогатого скота, в том числе коров. Соли метионина обладают значительными преимуществами перед самим метионином, и поэтому являются более привлекательными для широкого применения. На данный момент существует общая методика получения хелатных комплексов метионина, но каждый металл обладает своими особенностями, поскольку имеются разные произведения растворимости. Настоящая работа посвящена оптимизации условий синтеза метионата кальция, ценного кормового ингредиента и пищевой добавки. Процесс получения метионата кальция, как правило, включает взаимодействие метионина с источником кальция в щелочной среде и последующее выделение целевого продукта кристаллизацией. Оптимизация направлена на повышение выхода, улучшение чистоты продукта и снижение затрат на производство. Предложенная стратегия оптимизации включает проведение серии экспериментов с варьированием ключевых параметров, статистический анализ полученных данных для определения оптимальных условий и подтверждение результатов при повторных опытах. Таким образом, целью исследования является разработка метода получения эффективного метионата кальция с высоким выходом и чистотой, отвечающего требованиям промышленности и нормативным стандартам.

Ключевые слова: метионин, метионат кальция, кристаллизация.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-88-94**ВВЕДЕНИЕ**

Метионат кальция представляет собой хелатное соединение кальция с метионином. Данное соединение изучается в различных областях, включая кормовую промышленность, поскольку метионат кальция является ценной кормовой добавкой для сельскохозяйственных животных и птицы [1–3]. Он обеспечивает поступление в организм как кальция, необходимого для формирования костей и зубов, так и метионина – незаменимой аминокислоты, играющей важную роль в белковом синтезе, росте и развитии. Хелатная форма обеспечивает лучшую усвояемость этих элементов по сравнению с неорганическими солями. В пищевой промышленности метионат кальция рассматривается как потенциальная пищевая добавка, обогащающая продукты питания кальцием и метионином. В фармацевтической промышленности исследуется потенциальное использование метионата кальция в качестве лекарственного средства для профилактики и лечения остеопороза и других заболеваний, связанных с дефицитом кальция и метионина, так как он имеет высокую биодоступность и синергетический эффект.

На сегодняшний день производство метионата кальция ограничено существующими производственными мощностями, а также геополитическими факторами, влияющими на логистику и доступность импортных поставок. В связи с растущим спросом на метионат кальция разработка эффективных и экономически выгодных методов его получения является актуальной задачей [4].

Традиционные методы получения метионата кальция, как правило, включают следующие этапы:

1. Растворение метионина в водной среде.
2. Взаимодействие метионина с источником кальция (например, гидроксидом кальция, карбонатом кальция).
3. Выделение метионата кальция из раствора путем кристаллизации.
4. Сушку продукта [5].

Существуют методы с использованием гидроксида кальция и L- или DL-метионина; карбоната кальция (CaCO_3); оксида кальция (CaO); органических растворителей; микроволнового излучения; ультразвука; ионообменных смол [6].

Однако данные методы часто характеризуются недостаточным выходом целевого продукта, низкой чистотой и высокими затратами на производство. Это обусловлено влиянием множества факторов на процесс синтеза (например, соотношения реагентов, температуры, pH, времени реакции, эффективности перемешивания, природы используемых растворителей и методов выделения и очистки продукта).

В настоящей работе указаны результаты проведения синтеза метионата кальция с использованием гидроксида натрия и хлорида кальция, а также особенности его проведения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методика синтеза метионата кальция с использованием гидроксида натрия и хлорида кальция

Способ получения метионата кальция может быть представлен схемой (рис. 1).

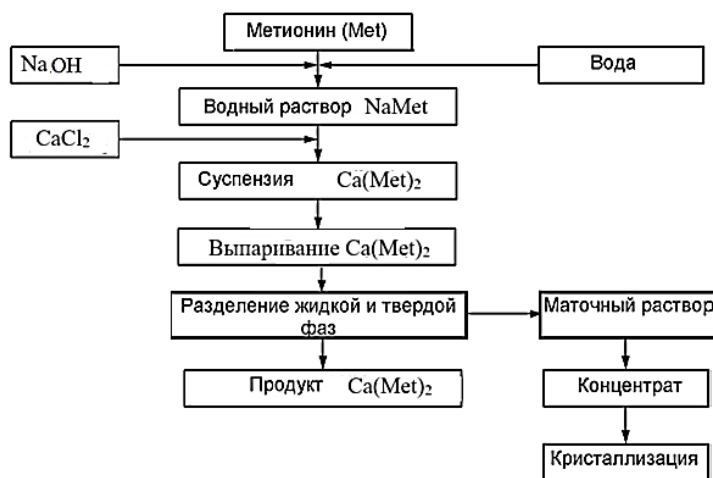


Рис. 1. Схема синтеза метионата кальция

Синтез соединения проводился по следующей методике:

- 1) готовили суспензию метионина в воде с концентрацией 10 %: 100 г метионина (0,68 моль) растворяли в 1 000 мл воды;

2) к приготовленной суспензии прибавляли 13,6 г (0,68 моль) гидроксида натрия, перемешивали в течение 10 мин, затем нагревали до 55–60 °С (рН гомогенного раствора 9–10);

3) к раствору порциями присыпали 37,74 г (0,34 моль) хлорида кальция при интенсивном перемешивании в течение 30–35 мин;

4) реакционную смесь упаривали в 2 раза;

5) реакционную смесь охлаждали до 10 °С, выпавший кристаллический продукт отфильтровывали, промывали водой от хлорид-ионов, параллельно проводя реакцию промывных вод на наличие хлорид-ионов с 0,1 М раствором нитрата серебра, затем промывали спиртом и замораживали;

6) полученный продукт сушили лиофильно в связи с тем, что данный вид сушки сохраняет структурную целостность и биологическую активность продукта.

Установка для проведения синтеза метионата кальция представлена на рис. 2.



Рис. 2. Установка для проведения синтеза метионата кальция

Синтез метионата кальция в водной среде хлорида кальция проводили по такой же методике, которая была описана выше, но без стадии добавления гидроксида натрия.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В отличие от общей методики синтеза хелатных комплексов метионата, в синтезе метионата кальция имеется стадия упаривания, что является его особенностью. Причиной добавления еще одной стадии является высокое произведение растворимости. Если образующаяся соль метионина имеет высокое значение произведения растворимости, она будет хорошо растворимой в используемом растворителе. Это означает, что даже при высоких концентрациях ионов металла и метионина соль может оставаться в растворе, не

выпадая в осадок. В этом случае реакция может не идти до конца, выход продукта будет низким.

В результате исследования было проведено сравнение методов получения метионата кальция в щелочной и водной средах.

Теоретический выход в щелочной среде был посчитан по реакциям процесса, представленным на рис. 3 и 4.

Теоретический выход в водной среде можно посчитать по реакции на рис. 5. Он будет равен выходу реакции в щелочной среде.

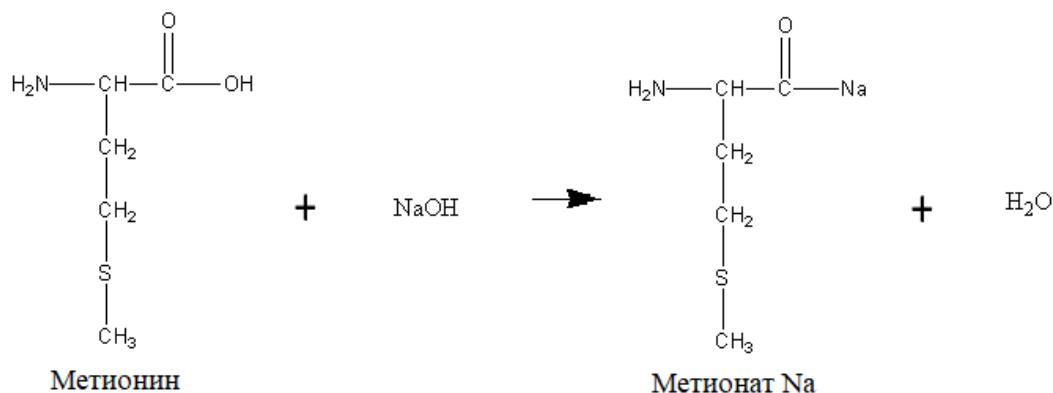


Рис. 3. Первая стадия синтеза метионата кальция

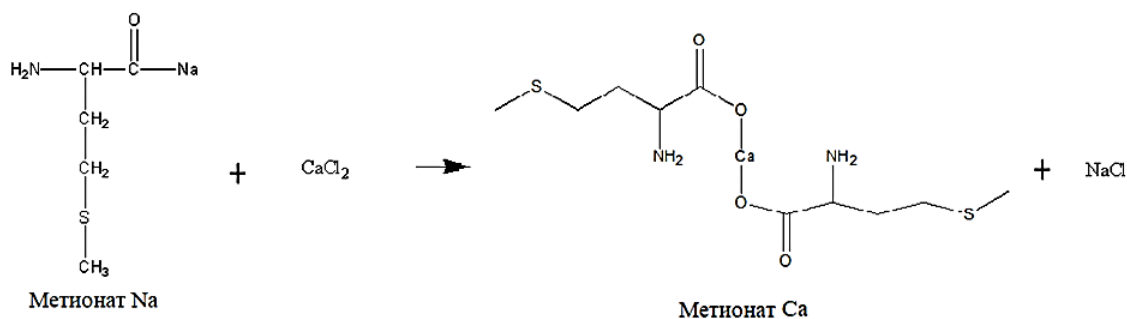


Рис. 4. Вторая стадия синтеза метионата кальция

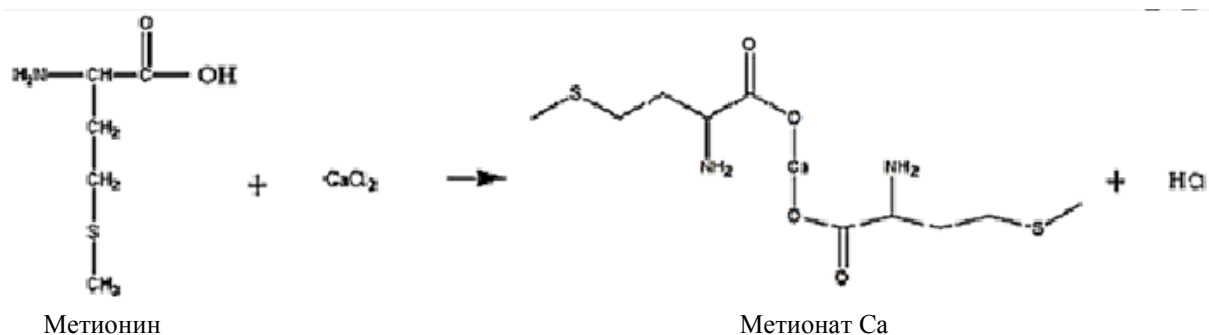


Рис. 5. Реакция синтеза метионата кальция в водной среде

Теоретический выход составил 72,83 г; практический выход по методике в водной среде – 74 %, в щелочной – 85 %. Исходя из полученных данных, можно говорить о синтезе в щелочной среде как более эффективной методике.

По итогам проведения рентгенофлуоресцентного анализа был получен количественный элементный анализ. Результаты количественного содержания кальция в хелатном комплексе представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа метионата кальция в водной среде

Компонент	Концентрация
$C_5H_{10}NO_2S$	96,92
Ca	3,05
Cu	0,03

Таблица 2

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа метионата кальция в щелочной среде

Компонент	Концентрация
$C_5H_{11}NO_2S$	86,31
Ca	13,31
Ti	0,063
Br	0,15
Sn	0,17

После проведенного анализа можно утверждать, что щелочная среда способствует более эффективному связыванию ионов кальция с метионином. В щелочной среде гидроксильные группы (ОН-) депротонируют молекулы метионина, что делает его более способным к комплексообразованию с кальцием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам исследований, посвященных оптимизации условий синтеза метионата кальция, можно сделать следующие выводы:

1. Среди указанных методов наиболее эффективен синтез в щелочной среде.
2. Особенность синтеза метионата кальция заключается в его высоком производстве растворимости, что не дает хелатному комплексу выпасть в осадок сразу.

3. Синтез в щелочной среде проходит с выходом 85 % метионата кальция, а в водной – 74 % метионата кальция от теоретически рассчитанного количества.

4. Более устойчивые комплексы образуются при синтезе в щелочной среде (13,31 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарова А.А., Волеводз Н.Н. Значение состава кальцийсодержащих препаратов в лечении и профилактике остеопенических состояний // *Проблемы эндокринологии*. 2010. Т. 56. № 3. С. 20–25.
2. Elango R. Methionine Nutrition and Metabolism: Insights from Animal Studies to Inform Human Nutrition // *J. Nutr.* 2020. No. 150. P. 2518–2523. URL: <https://doi.org/10.1093/jn/nxaa155> (дата обращения: 16.01.2025).
3. Кадырова Р.Г., Кабиров Г.Ф., Муллахметов Р.Р. Биологические свойства и синтез комплексных солей α-аминокислот биогенных металлов: монография. Казань: КГЭУ, 2014. 108 с.
4. Накоскин А.Н., Воронцов Б.С., Лунева С.Н., Ваганова Л.А. Квантово-химическое моделирование аминокислотных комплексов кальция и оценка возможности их применения для восполнения кальция // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. Вып. 3. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=6224> (дата обращения: 16.01.2025).
5. Фрумина Н.С. Аналитическая химия кальция. М.: Книга по Требованию, 2012. 127 с.
6. Li Z., Wang F., Liang B., Li Z., Wang F., Liang B., Su Y., Sun S., Xia S., Shao J., Zhang Z., Min Hong, Zhang F., Zheng S. Methionine Metabolism in Chronic Liver Diseases: an Update on Molecular Mechanism and Therapeutic Implication // *Signal Transduct Target Ther.* 2020. No. 5 (1) P. 280. URL: <https://doi.org/10.1038/s41392-020-00349-7> (дата обращения: 16.01.2025).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

СИДОРОВ Александр Иванович – кандидат химических наук, профессор кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sidorov_science@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Петрова А.И., Цветков Д.Ю., Лакина Н.В., Долуда В.Ю., Сидоров А.И. Оптимизация условий получения метионата кальция // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 1 (25). С. 88–94.

OPTIMIZATION OF CONDITIONS FOR OBTAINING CALCIUM METHIONATE

A.I. Petrova, D.Yu. Tsvetkov, N.V. Lakina, V.Yu. Doluda, A.I. Sidorov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Methionine is a part of proteins and peptides. The methionine-based feed additive is designed to improve the growth and productivity of cattle, including cows. Methionine salts have significant advantages over methionine itself, making them more attractive for a wide range of applications. At the moment, there is a general method for obtaining chelated methionine complexes. But each metal has its own characteristics, meaning different products of solubility. This work is devoted to optimizing the conditions for the synthesis of calcium methionate, a valuable feed ingredient and food additive. The process of obtaining calcium methionate, as a rule, involves the interaction of methionine with a calcium source in an alkaline medium, followed by the release of the target product by crystallization.

Keywords: methionine, calcium methionate, crystallization.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

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

SIDOROV Alexander Ivanovich – Candidate of Chemical Sciences, Professor of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sidorov_science@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Petrova A.I., Tsvetkov D.Yu., Lakina N.V., Doluda V.Yu., Sidorov A.I. Optimization of conditions for obtaining calcium methionate // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 1 (25), pp. 88–94.

УДК 543.84.849

**КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕДИ В ХЕЛАТНОМ КОМПЛЕКСЕ
С МЕТИОНИНОМ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА**

Д.Ю. Цветков, А.И. Петрова, Н.В. Лакина В.Ю. Долуда, А.И. Сидоров
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Цветков Д.Ю., Петрова А.И., Лакина Н.В.,
Долуда В.Ю., Сидоров А.И., 2025

Аннотация. В статье отмечено, что главное преимущество метионата меди заключается в более высокой биодоступности по сравнению с неорганическими солями меди, такими как сульфат меди или оксид меди. Таким образом, организм может усвоить и использовать больше меди из метионата, что делает его более эффективным. Хелатная форма защищает медь от связывания с ингибиторами абсорбции в кишечнике, обеспечивая лучшее усвоение. Метионат меди добавляется в корма для различных сельскохозяйственных животных, включая свиней, птиц, крупный рогатый скот и даже рыбу, чтобы обеспечить адекватное поступление меди. Медь важна для множества физиологических процессов у животных. Хелатирование – это процесс соединения иона микроэлемента с органической молекулой (хелатором), что защищает молекулу-хелатор от разрушения в желудочно-кишечном тракте и способствует ее эффективной транспортировке через клеточные мембраны. Благодаря данной особенности хелатные минералы усваиваются организмом значительно лучше, и это позволяет достичь желаемого эффекта при использовании меньших доз. Более того, хелатные минералы лучше взаимодействуют с другими питательными веществами внутри клетки, обеспечивая синергетический эффект и повышая эффективность всего процесса обмена веществ. Анализ метионата меди имеет многостороннее значение в науке и практике. В настоящей работе был проведен анализ хелатного комплекса метионата меди методом рентгенофлуоресцентного анализа и выявлена его эффективность для анализа металла в хелатном комплексе.

Ключевые слова: метионат меди, хелатирование, рентгенофлуоресцентный анализ, хелатный комплекс.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-95-102

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития российской промышленности и сельского хозяйства важной задачей является импортозамещение промышленной и пищевой продукции. Таким образом, актуально решение задач по повышению эффективности методов выращивания и содержания сельскохозяйственных животных. Одним из ключевых факторов, обеспечивающих крепкое здоровье и высокую продуктивность указанных животных, является полноценное минеральное питание. Особую роль в этом играют микроэлементы – незаменимые «кирпичики» для построения и поддержания всех систем организма, включая опорно-двигательный аппарат. В частности, микроэлементы критически важны для формирования и развития костной ткани, поскольку обеспечивают целостность скелета и предотвращают различные патологии [1–3].

Медь является незаменимым компонентом синтеза коллагена – структурного белка, отвечающего за прочность костей, связок, хрящей и других соединительных тканей. Дефицит этого микроэлемента приводит к замедлению роста, ослаблению костной ткани, повышению риска переломов и развитию различных заболеваний опорно-двигательного аппарата. Кроме того, медь участвует во множестве других важных метаболических процессов, влияющих на иммунитет, репродуктивную функцию и общий уровень продуктивности животных [4].

Традиционно в животноводстве широко применялись неорганические формы микроэлементов, привлекательные своей низкой стоимостью. Однако их биодоступность, т.е. способность усваиваться организмом, значительно ниже, чем у органических форм. Это приводит к необходимости использования существенно больших доз неорганических микроэлементов для достижения необходимого эффекта. Хотя низкая токсичность позволяет применять такие завышенные дозы без непосредственного вреда здоровью, это не гарантирует оптимального усвоения и, как следствие, не дает животным необходимый уровень минерального обеспечения. Кроме того, избыток некоторых неорганических микроэлементов может привести к накоплению их в тканях и негативно повлиять на другие физиологические процессы.

Современные исследования подтверждают, что использование хелатных минералов в кормлении сельскохозяйственных животных приводит к повышению показателей роста, продуктивности, укреплению иммунитета и улучшению состояния костной ткани. Это особенно актуально для животных в периоды интенсивного роста, беременности, лактации и стрессовых ситуаций, когда потребность в микроэлементах значительно возрастает [5].

Применяемый в данной методике метод – рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) – основан на измерении интенсивности рентгеновского флуоресцентного (характеристического) излучения определяемых элементов. Флуоресцентное излучение возбуждается первичным излучением рентгеновской трубки (РТ). Под интенсивностью понимается поток квантов [квант/с] флуоресцентного излучения, проходящего через датчик системы его регистрации. Мерой интенсивности является аналитический сигнал, представляющий собой скорость счета [имп/с] электрических импульсов датчика, которая для каждой линии флуоресцентного излучения пропорциональна его интенсивности [6].

Содержания элементов определяют с помощью предварительно построенных градуировочных характеристик (ГХ). Они представляют собой для каждого элемента экспериментально определенную зависимость его содержания от аналитических сигналов. Для построения ГХ используют измерения аналитических сигналов на градуировочных образцах (ГО). Это образцы почв с известным химическим составом. Для измерений из всего множества линий флуоресценции используется часть, которая называется аналитическими линиями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методика проведения анализа метионата меди методом РФА

1. Измельчение пробы.

Перед проведением анализа проба должна быть измельчена. Для этой цели отбирается навеска массой не менее 25 г. Навеску набирают из 5–10 частей исходного материала, который предварительно рассыпают ровным слоем на разделочном столе. Измельчение проводят, используя оборудование, не загрязняющее пробу. Для этого

мельющие элементы оборудования (ступки или истиратели) не должны содержать анализируемых элементов.

Степень измельчения считают удовлетворительной, если выход класса составляет 71 мкм после измельчения не менее 95 %.

2. Квартование пробы.

Измельченная масса навески Q обычно избыточна для рентгеновского флуоресцентного анализа. Для уменьшения количества пробы и повышения ее однородности применяют квартование пробы. Этот прием заключается в следующем. Измельченную пробу рассыпают на ровной поверхности в виде квадрата толщиной слоя 2 мм. Квадрат делят диагоналями на четыре треугольника, причем содержимое одной пары противоположных треугольников объединяют и используют для измерений, а содержимое другой пары применяют в качестве дубликата.

3. Введение пробы в спектрометр.

Материал пробы засыпают в тарелочку, входящую в комплект поставляемой со спектрометром разборной кюветы, до образования горки и уплотняют с помощью цилиндрического пуансона, изготовленного из материала, не загрязняющего пробу. В качестве пуансона может быть использована, например, стеклянная пробка. Затем вновь добавляют материал до образования горки и раздавливают стеклом для формирования плоской поверхности, находящейся вровень с краями тарелочки.

Тарелочку накрывают куском полиэтиленотерфталатной пленки толщиной 6 мкм и размерами 30×30 мм. Ее закрепляют (натягивают) с помощью алюминиевого конического кольца, входящего в комплект разборной кюветы. Подготовленные образцы вставляют в кювету, кювету – в спектрометр, после чего приступают к подготовке следующего образца.

Измерение массовой доли элемента в пробе проводят в режиме «Анализ» в соответствии с программой количественного анализа. Значения массовой доли элементов рассчитываются автоматически, отражаются на мониторе компьютера. Их можно сохранить в памяти компьютера и при желании распечатать на принтере.

В ходе анализа проводят два последовательных определения, каждое из которых включает заполнение кюветы, экспонирование пробы и вычисление результата.

Чтобы оценить эффективность данного метода для количественного определения меди в хелатном комплексе с метионином, был выбран метод йодометрического титрования.

Методика йодометрического титрования метионата меди

Заполняют бюретку раствором тиосульфата натрия и закрывают трубкой с натральной известью. В колбу для титрования емкостью 100 мл вносят пипеткой 10 мл раствора меди, 2 мл раствора серной кислоты, 30 мл раствора иодида калия и титруют раствором тиосульфата до появления бледно-желтой окраски суспензии. Затем добавляют несколько капель раствора крахмала и продолжают медленно титровать при перемешивании, пока суспензия не станет белой. Отмечают объем израсходованного тиосульфата натрия. После этого рассчитывают массу меди, содержащуюся в образце, по формуле

$$m = \frac{V_{S_2O_3^{2-}}}{V_{Cu}} * C_{S_2O_3^{2-}} * \frac{V_{колб}}{1000} * M_{Cu},$$

где $V_{S_2O_3^{2-}}$ – объем раствора тиосульфата, пошедшего на титрование, мл; V_{Cu} – объем титруемого раствора меди, мл; $C_{S_2O_3^{2-}}$ – концентрация тиосульфата, моль/л; $V_{колб}$ – объем мерной колбы, содержащей анализируемый раствор, мл; $M_{Cu} = 63,54$ – молярная масса меди, г/моль.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлены результаты исследования метионата меди методом рентгенофлуоресцентного анализа. Присутствие меди в образцах было доказано по наличию характеристического пика интенсивности на РФС-спектрах. Количественно содержание меди определялось в режиме «Анализ» в соответствии с программой количественного анализа. Данные о количественном элементарном составе хелатного комплекса метионина с медью представлены в табл. 1.

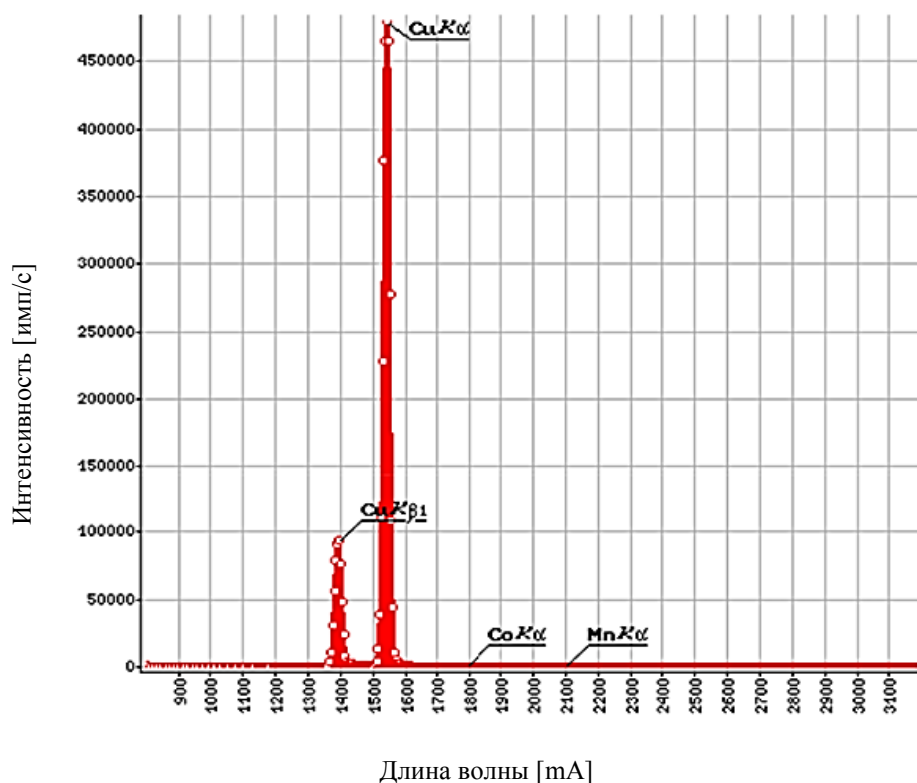


Рис. 1. Рентгенофлуоресцентный спектр хелатного комплекса метионата меди

Таблица 1

Элементарный состав метионата меди

Элемент	Содержание, %
Cu	16,55
Mn	0,016
Co	0,006

По результатам йодометрического титрования метионата меди было определено количественное содержание меди в комплексе. Среднее содержание меди в хелатном комплексе с метионином составляет 17,21 % ($n = 3$; RSD (относительное стандартное отклонение) = 1,14 %).

По теоретическим данным было рассчитано процентное содержание меди в полученном хелатном комплексе, учитывая отношение атома меди к молекуле метионина 1 : 2. Структурная формула хелатного комплекса метионата меди представлена на рис. 2.

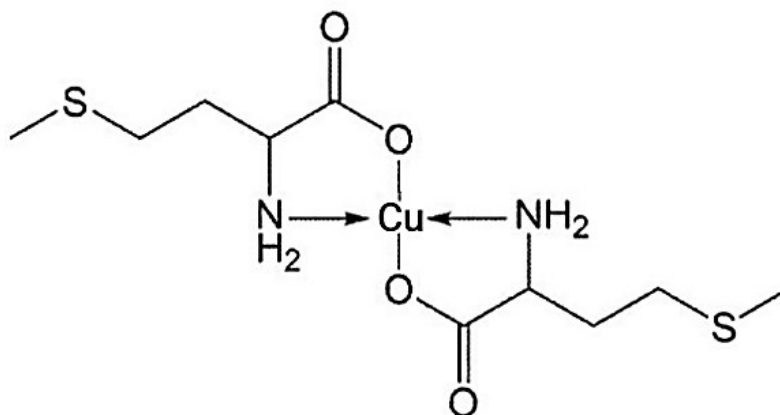


Рис. 2. Структурная формула метионата меди

Согласно расчетным данным, количество меди в комплексе составляет 17,78 %.

Результаты комплексонометрического титрования и рентгенофлуоресцентного анализа свидетельствуют о соответствии стехиометрического соотношения моль-эквивалентов меди и метионина в синтезированном комплексе 1 : 2. Полученные результаты коррелируют с литературными данными, где структура метионата меди представляется таким образом, что один атом меди связан с двумя молекулами метионина, при этом каждая молекула метионина связана с одним атомом меди.

Сравнительные результаты анализа количественного содержания меди в синтезированном хелатном комплексе представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты анализа содержания меди в синтезированном хелатном комплексе

Элемент	Метод		
	РФА, %	Титрование, %	Теоретическое содержание, %
Cu	16,55	17,21	17,78

По результатам, представленным в таблице, можно сделать вывод, что методы, используемые для количественного анализа меди в хелатном комплексе с метионином, показывают хорошую сходимость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенного исследования необходимо отметить, что метод рентгенофлуоресцентного анализа применим для анализа хелатных комплексов метионина с медью. Данный метод показывает хорошую сходимость, а кроме того, он прост в использовании. В сравнении с альтернативным методом количественного определения меди в комплексе (йодометрическим титрованием) данный метод отличается быстротой и достаточной точностью. За счет применения калибровочной модели было установлено содержание меди в синтезированном хелатном комплексе – 16,6 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревенко А.Г. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов. Новосибирск: Наука, 1994. 264 с.
2. Бахтиаров А.В., Савельев С.К. Рентгенофлуоресцентный анализ минерального сырья. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2014. 148 с.
3. Кадырова Р.Г., Кабиров Г.Ф., Муллахметов Р.Р. Синтез медных и цинковых солей метионина и глицина // *Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана*. 2013. № 1 (213). С. 109–115.
4. Кадырова Р.Г., Кабиров Г.Ф., Муллахметов Р.Р. Синтез и свойства комплексных солей биогенных кислот макро- и микроэлементов. Казань: КГЭУ, 2016. 115 с.
5. Rudolph H., Schreiber W. X-ray Fluorescence Analysis: Principles and Applications // *Journal of Analytical Chemistry*. 2010. No. 65 (1). P. 1–8.
6. García-González M., de la Torre C. X-ray Fluorescence Spectroscopy: a Powerful Tool for the Characterization of Metal Ions in Biological Systems // *Biological Trace Element Research*. 2019. No. 188 (2). P. 293–304.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

СИДОРОВ Александр Иванович – кандидат химических наук, профессор кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sidorov_science@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Цветков Д.Ю., Петрова А.И., Лакина Н.В., Долуда В.Ю., Сидоров А.И. Количественное определение меди в хелатном комплексе с метионином методом рентгенофлуоресцентного анализа // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 1 (25). С. 95–102.

**QUANTITATIVE DETERMINATION OF COPPER
IN A CHELATED COMPLEX WITH METHIONINE
BY X-RAY FLUORESCENCE ANALYSIS**

D.Yu. Tsvetkov, A.I. Petrova, N.V. Lakina, V.Yu. Doluda, A.I. Sidorov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The main advantage of copper methionate is its higher bioavailability compared to inorganic copper salts such as copper sulfate or copper oxide. This means that the body can absorb and use more copper from methionate, making it more effective. The chelated form protects copper from binding to absorption inhibitors in the intestine, providing better absorption. It is added to feed for various farm animals, including pigs, birds, cattle and even fish, to ensure an adequate supply of copper. Copper is important for a variety of physiological processes in animals. Chelation is the process of combining a trace element ion with an organic molecule (chelator), which protects it from destruction in the gastrointestinal tract and promotes its efficient transport through cell membranes. Due to this feature, chelated minerals are absorbed by the body much better, which allows you to achieve the desired effect when using smaller doses. Moreover, they interact better with other nutrients inside the cell, providing a synergistic effect and increasing the efficiency of the entire metabolic process. The analysis of copper methionate

has a multifaceted significance in science and practice. It helps to understand the biological functions of copper, develop new treatment methods, and optimize agricultural practices. In this work, the copper methionate chelate complex was analyzed by X-ray fluorescence analysis and its effectiveness for metal analysis in the chelate complex was revealed.

Keywords: copper methionate, chelation, X-ray fluorescence analysis, chelate complex.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

TSVETKOV Dmitry Yuryevichu – 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

SIDOROV Alexander Ivanovich – Candidate of Chemical Sciences, Professor of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sidorov_science@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Tsvetkov D.Yu., Petrova A.I., Lakina N.V., Doluda V.Yu., Sidorov A.I. Quantitative determination of copper in a chelated complex with methionine by x-ray fluorescence analysis // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 1 (25), pp. 95–102.

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 (25), 2025

Редактор С.В. Борисов
Корректор С.В. Зорикова

Подписано в печать 08.07.2025

Дата выхода в свет 08.07.2025

Формат 60 x 84 1/8

Физ. печ. л. 13

Тираж 500 экз.

Цена свободная

Усл. печ. л. 12,09

Заказ № 26231

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 11,31

С – 104

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
Адрес издателя: 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22
Отпечатано в ООО «Издательство «Триада»
170034, Тверь, пр. Чайковского, д. 9, офис 514