

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

№ 3 (27), 2025

Тверь 2025

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2025. № 3 (27). 102 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>Баркая Т.Р., Соколов С.А., Двужилов А.С.</i> Оценка экономической эффективности покрытий, выполненных в различных вариантах исполнения деревянных конструкций на пролетах от 7 до 12 м.....	5
<i>Курятников Ю.Ю.</i> Применение стеклокомпозитной арматуры для армирования забивных свай квадратного сечения.....	11
<i>Субботин С.Л., Баркая Т.Р., Пронина А.В.</i> Оценка влияния деформируемости сжато-изогнутой колонны на ее устойчивость.....	17
<i>Трофимов В.И.</i> К вопросу применения тяжелого бетона с учетом изменяющихся условий строительства в Арктической зоне	25

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Маринова С.В.</i> Алгоритм анализа данных для моделирования графика нагрузки электропотребления промышленного предприятия с целью снижения размера оплаты электроэнергии.....	36
<i>Павлов В.Д.</i> Электромеханический аккумулятор.....	47
<i>Попов И.П.</i> Свойства магнитных монополей и силовые линии магнитного поля.....	53
<i>Рахманов А.А., Русин А.Ю.</i> Решение вопроса местного дефицита мощности в энергосистеме с помощью малых ГЭС.....	60

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Курагин А.А., Пичугина А.И., Лакина Н.В., Сульман М.Г., Долуда В.Ю.</i> Определение вероятности столкновений реагирующих молекул в одномерном канале цеолита H-ZSM-5 для процесса трансформации спиртов в углеводороды.....	68
<i>Курагин А.А., Пичугина А.И., Старовойтова Н.Ю., Старовойтов А.В., Чалов К.В., Устимов А.В., Долуда В.Ю.</i> Определение метрологических характеристик хроматографического анализа смеси водорода и углекислого газа в процессе получения формальдегида и его производных	80
<i>Петрова А.И., Цветков Д.Ю., Лакина Н.В., Долуда В.Ю., Сидоров А.И.</i> Исследование оптимальных методов количественного определения полифенольных соединений в фитосборах.....	86
<i>Старовойтов А.В., Пичугина А.И., Долуда В.Ю., Соболев А.Е.</i> Влияние органических добавок на скорость окисления сульфита натрия.....	95

CONTENTS

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<i>Barkaya T.R., Sokolov S.A., Dvuzhilov A.S.</i> Assessment of the economic efficiency of coatings made from various versions of wooden structures on spans from 7 to 12 m.....	5
<i>Kuryatnikov Yu.Yu.</i> Use of glass-composite reinforcement for producing square-sectioned piles.....	11
<i>Subbotin S.L., Barkaya T.R., Pronina A.V.</i> Assessment of the influence of deformability of compression-curved column on its stability.....	17
<i>Trofimov V.I.</i> On the issue of the use of heavy concrete in the Arctic zone, taking into account changing construction conditions.....	25

ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Marinova S.V.</i> Data analysis algorithm for graph modeling electricity consumption of an industrial enterprise with the aim of reducing electricity costs	36
<i>Pavlov V.D.</i> Electromechanical battery.....	47
<i>Popov I.P.</i> Properties of magnetic monopoles and magnetic field lines of force.....	53
<i>Rakhmanov A.A., Rusin A.Yu.</i> Solving issue of local power shortage in energy system with help of a small scale hydroelectric power plant.....	60

CHEMICAL TECHNOLOGY

<i>Kuragin A.A., Pichugina A.I., Lakina N.V., Sulman M.G., Doluda V.Yu.</i> Determination of the probability of collisions of reacting molecules in the one-dimensional channel of zeolite H-ZSM-5 for the process of alcohols transformation into hydrocarbons.....	68
<i>Kuragin A.A., Pichugina A.I., Starovoytova N.Yu., Starovoytov A.V., Chalov K.V., Ustimov A.V., Doluda V.Yu.</i> Determination of metrological characteristics of chromatographic analysis of a mixture of hydrogen and carbon dioxide in the process of obtaining formaldehyde and its derivatives.....	80
<i>Petrova A.I., Tsvetkov D.Yu., Lakina N.V., Doluda V.Yu., Sidorov A.I.</i> Research of optimal methods for quantitative determination of polyphenol compounds in herbal branches.....	86
<i>Starovoytov A.V., Pichugina A.I., Doluda V.Yu., Sobolev A.E.</i> Effect of organic additives on the oxidation rate of sodium sulfite.....	95

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 624.011.1:674.031

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОКРЫТИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ В РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ИСПОЛНЕНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРОЛЕТАХ ОТ 7 ДО 12 М

*Т.Р. Баркая, С.А. Соколов, А.С. Двужилов**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Баркая Т.Р., Соколов С.А., Двужилов А.С., 2025

Аннотация. В современных строительных конструкциях деревянные покрытия находят широкое применение благодаря своей экологичности и легкости в сочетании с достаточно высокой прочностью. В статье рассмотрены три типа деревянных балок: клееные, балки Деревягина и шпренгельные. Изучены их конструктивные особенности и прочностные характеристики в большепролетных зданиях. Проведен сравнительный анализ работы балок под нагрузкой, исследована их деформативность, а также экономическая эффективность.

Ключевые слова: деревянные конструкции, клееные балки, балки Деревягина, шпренгельные балки, экономическая эффективность, жесткость.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-5-11

ВВЕДЕНИЕ

Деревянные конструкции остаются востребованными в строительстве благодаря сочетанию прочности, легкости и эстетики. Однако применение обычных деревянных конструкций из стандартных пиломатериалов хвойных пород на пролетах более 6,5 м не представляется возможным. В этом случае необходимо использовать различные методы соединения слоев, выполненных из стандартных пиломатериалов, либо комбинации деревянных конструкций с элементами, выполненными из других материалов.

В настоящее время в мировой практике решение данной проблемы сместилось в область применения в подобных случаях клееных балок. Указанный тип конструкций является весьма дорогим в исполнении, поэтому очень важно, чтобы в строительной отрасли были и другие варианты конструктивных решений, которые могли бы на равных конкурировать с клееными балками [5].

Цель исследования: сравнить экономическую эффективность применения различных вариантов конструкций в покрытиях зданий и сооружений на пролетах от 7 до 12 м.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках настоящей работы были исследованы три типа балок:

1. Клееные – балки, изготавливаемые из слоев древесины, склеенные между собой, что обеспечивает высокую прочность и устойчивость к деформациям.

2. Балки Деревягина – составные брусчатые балки, сплавляемые из двух или трех брусьев при помощи пластинчатых нагелей из твердых сортов древесины.

3. Шпренгельные – балки, усиленные дополнительными элементами (затяжками, подкосами), выполненными из стальных деталей.

Согласно нормативной документации [1], номинальные размеры длины пиломатериалов не превышают 6,5 м. Зачастую пролеты покрытий больше 6 м, поэтому необходима разработка нестандартных конструктивных решений по исполнению деревянных конструкций вышеперечисленных балок.

Исходные данные: место строительства – г. Одинцово, здание отапливаемое, пролет балки $l = 12$ м, шаг балок 2,0 м. На балку действуют постоянные и временные нагрузки. Постоянная нагрузка складывается из массы конструкций покрытия и собственной массы балки. За временную нагрузку принимаем нагрузку от снега для III снегового района.

Клееная балка. Расчет клееных деревянных балок ведется по известным формулам для изгибаемых элементов согласно нормативной документации [2]. Вводится ряд поправочных коэффициентов k_w к моменту сопротивления сечения и расчетному сопротивлению древесины на изгиб, которые учитывают толщину слоев, высоту сечения, наличие ослаблений и другие факторы для клееных элементов [3].

В результате расчета было получено сечение размерами 140×594 мм, а значения коэффициентов использования по первой и второй группам предельных состояний составили:

1. Прочность при действии изгибающего элемента – 0,91.
2. Прочность при действии поперечной силы – 0,38.
3. Жесткость – 0,56.

Как мы видим, при заданных исходных данных определяющей является прочность балки.

Балка Деревягина. Расчет балки заключается в определении размеров сечения, числа пластинок и величины строительного подъема согласно нормативной документации [2].

Рассчитывалась балка из трех слоев стандартной древесины длиной 6 м, которые объединялись нагельным соединением, выполненным из твердых слоев древесины [4, 6]. Рассмотрены шпонки 2 типов – из дуба и акации [7].

В результате расчета было получено сечение размерами 150×600 мм, количество шпонок из акации на 14,29 % меньше, чем из дуба.

Значения полученных коэффициентов использования по первой и второй группам предельных состояний составили:

1. Прочность при действии изгибающего элемента – 0,94.
2. Прочность при действии поперечной силы – 0,1.
3. Жесткость – 0,74.

Как и в предыдущем варианте исполнения балки, при заданных исходных данных определяющим показателем является прочность.

На рис. 1 приведены расчетные схемы и подобранные сечения для клееной балки и балки Деревягина.

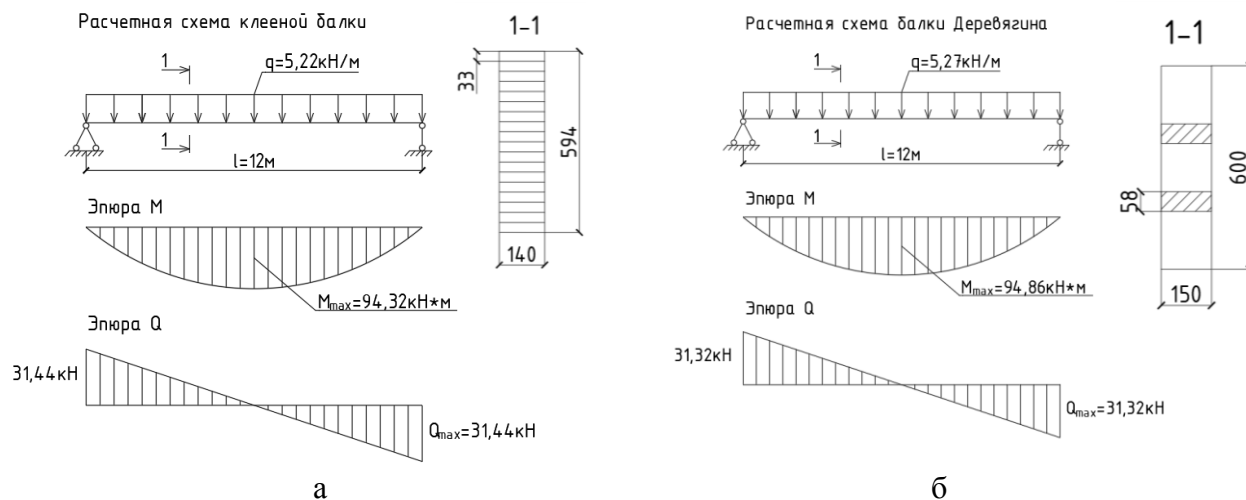
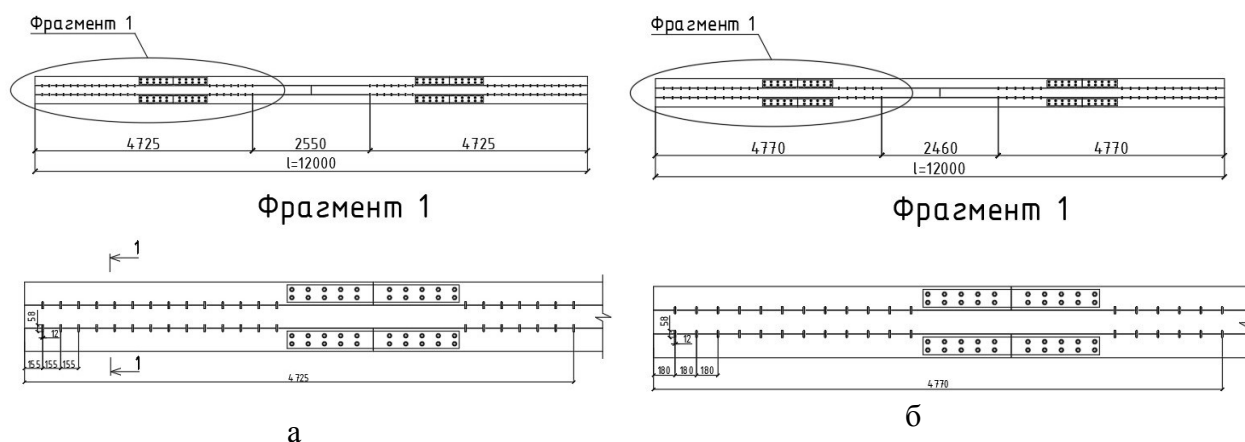


Рис. 1. Расчетные схемы балок: а – клееная балка; б – балка Деревягина

На рис. 2 показана расстановка пластинчатых нагелей из дуба и акации для балки Деревягина.

Рис. 2. Расстановка пластинчатых нагелей балки Деревягина:
а – из дуба; б – из акации

Ввиду более высокой прочности акации количество пластинчатых нагелей в конструкции сокращается, однако из-за ее более высокой стоимости уменьшение числа нагелей не приводит к удешевлению конструкции.

Шпренгельная балка. Шпренгель представляет собой ферму, где система раскосов и стоек позволяет фактически получить дополнительную опору в середине балки. Проверку сечения верхнего пояса проводят по формуле для сжато-изгибаемых стержней. Расчеты выполняются в соответствии с нормативной документацией [2, 8].

В результате расчета было получено сечение верхнего пояса размерами 140×363 мм. Сечение раскосов принимаем из круглой арматурной стали (сталь С355 по

ГОСТ 27772-2021, $R_y = 345 \text{ МПа} = 34,5 \text{ кН/см}^2$), сечение стойки – из круглой трубы $30 \times 2,5 \text{ мм}$ (сталь С245, $R_y = 240 \text{ МПа} = 24 \text{ кН/см}^2$).

Значения полученных коэффициентов использования по первой и второй группам предельных состояний составили:

1. Прочность верхнего пояса – 0,89.
2. Прочность раскосов – 0,8.
3. Прочность стойки – 0,78.
4. Жесткость – 0,5.

Как и в предыдущих вариантах, при заданных исходных данных определяющей является прочность балки.

На рис. 3 показана шпренгельная балка, а также эпюра нормальных сил.

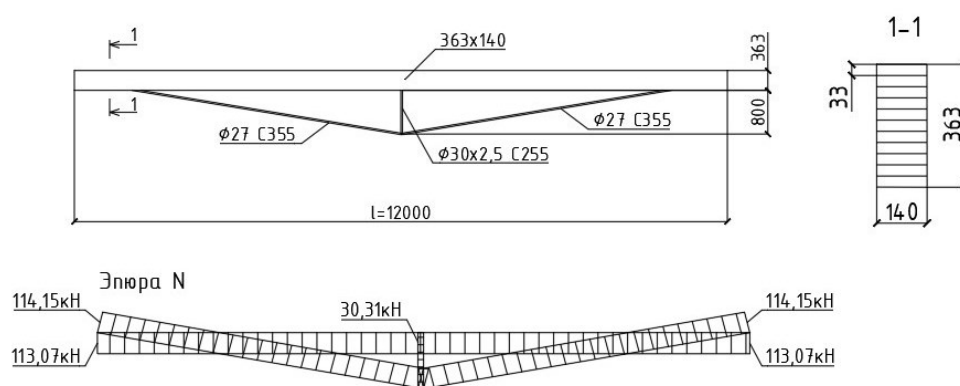


Рис. 3. Шпренгельная балка

Полученные значения жесткостей балок сведены и представлены на графике вертикальных перемещений (рис. 4).



Рис. 4. График деформации балок

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам расчетов была определена стоимость различных вариантов исполнения конструкций покрытия на пролетах от 7 до 12 м. Учитывались все элементы конструкций, а монтажом можно пренебречь, поскольку он является примерно одинаковым для всех типов балок. Результаты показаны в таблице.

Результаты оценки стоимости рассмотренных типов конструкций

Тип конструкции	Стоимость, руб/шт.
Клееная балка	60 000
Балка Деревягина (дуб)	45 200
Балка Деревягина (акация)	45 500
Шпренгельная балка	38 700

Как видно, экономически целесообразно использовать на рассматриваемых пролетах шпренгельные балки, так как применение в них стальных поддерживающих элементов, обладающих значительно большей прочностью, существенно снижает стоимость конструкции и при этом практически не увеличивает ее вес. Использование балок Деревягина в данном случае тоже является экономически оправданным, если сравнивать с клееными балками, в случае нежелания применения в конструкции стальных элементов. При этом видно, что использование клееных балок – это самый дорогостоящий вариант из рассматриваемых, но с точки зрения эстетики они, разумеется, выигрывают в сравнении с остальными.

Здесь следует отметить, что наибольший прогиб имеет балка Деревягина. Это связано с податливостью шпоночных соединений, соединяющих между собой слои балки. Клееная балка имеет меньшую податливость и, как следствие, большую жесткость. У шпренгельной балки самые маленькие перемещения ввиду большей жесткости стальных раскосов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С точки зрения экономической эффективности лучше всего показала себя шпренгельная балка, однако с точки зрения архитектуры и композиционных решений наиболее предпочтительнее выглядит клееная балка. При этом шпренгельная балка обладает большей жесткостью, чем другие типы конструкций.

Балка Деревягина имеет наибольший прогиб и среднюю стоимость. Применение шпонок из акации уменьшает их количество, но является нецелесообразным, поскольку ведет к удорожанию конструкции. Разница в стоимости балок с различными материалами шпонок не будет превышать 1 %.

Необходимо отметить, что применение балок Деревягина увеличивает, по сравнению со шпренгельными балками, стоимость одного конструктивного элемента в среднем на 20 %, а использование клееных балок ведет к увеличению стоимости в 1,8 раза.

Подводя итог, можно сказать, что на сегодняшний день существует довольно неплохая альтернатива применению клееных балок в покрытиях зданий на пролетах от 7 до 12 м. Наиболее экономически оправданной является шпренгельная балка, которую можно использовать при строительстве зданий, где нет особых требований к внешнему виду конструкций покрытия. Это позволит снизить стоимость конструкций практически в два раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 24454-80. Пиломатериалы хвойных пород. Размеры. М.: Стандартиформ, 2007. 4 с.
2. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. М.: Минстрой России, 2017. 105 с.
3. Иванов В.Ф. Деревянные конструкции: учебное пособие. М.: Госстройиздат, 1956. 320 с.
4. ГОСТ Р 56711-2015. Соединения нагельного типа для деревянных конструкций. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2016. 12 с.
5. Исследование работы металлических и деревянных конструкций и оценка срока их службы с учетом условий эксплуатации / А.Г. Черных [и др.]; СПб.: СПбГАСУ, 2022. 354 с.
6. Смирнов П.Н., Погорельцев А.А. Определение несущей способности нагельных соединений на основании стандартных характеристик материалов. *Современные строительные конструкции из металла и древесины: Сборник научных трудов / под ред. В.В. Стоянова [и др.]*. Одесса: Одесская государственная академия строительства и архитектуры, 2013. С. 247–253.
7. ГОСТ 33082-2014. Конструкции деревянные. Методы определения несущей способности узловых соединений. М.: Стандартиформ, 2015. 14 с.
8. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М.: Минстрой России, 2017. 286 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАРКАЯ Темур Рауфович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Баркая Т.Р., Соколов С.А., Двужилов А.С. Оценка экономической эффективности покрытий, выполненных в различных вариантах исполнения деревянных конструкций на пролетах от 7 до 12 м // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 3 (27). С. 5–11.

**ASSESSMENT OF THE ECONOMIC EFFICIENCY OF COATINGS
MADE FROM VARIOUS VERSIONS OF WOODEN STRUCTURES
ON SPANS FROM 7 TO 12 M**

T.R. Barkaya, S.A. Sokolov, A.S. Dvuzhilov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. In modern building structures, wooden coverings are widely used due to their environmental friendliness and lightness combined with sufficiently high strength. This article discusses three types of wooden beams: glued, wooden and spar beams. Their design features and strength characteristics in large-span buildings are studied. A comparative analysis of their work under load, deformability and economic efficiency is carried out.

Keywords: wooden structures, glued beams, Derevyagin beams, sprengel beams, economic efficiency, rigidity.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BARKAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

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

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Barkaya T.R., Sokolov S.A., Dvuzhilov A.S. Assessment of the economic efficiency of coatings made from various versions of wooden structures on spans from 7 to 12 m // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 3 (27), pp. 5–11.

УДК 691.328

**ПРИМЕНЕНИЕ СТЕКЛОКОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ
ДЛЯ АРМИРОВАНИЯ ЗАБИВНЫХ СВАЙ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ**

Ю.Ю. Курятников
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Курятников Ю.Ю., 2025

Аннотация. Рассмотрена возможность применения стеклокомпозитной арматуры в конструкции забивных свай квадратного сечения. Представлены результаты опытной забивки свай, армированных композитной арматурой. Установлено, что сваи,

армированные композитной арматурой, по своим свойствам в рабочем положении не отличаются от свай, армированных стальной арматурой. Установлена зависимость значения максимально допустимой силы от ее ориентации при вдавливании свай. Определен экономический эффект от замены стальной арматуры композитной, выражающийся в снижении стоимости конечного продукта.

Ключевые слова: забивные сваи, стеклокомпозитная арматура, испытания на прочность и трещиностойкость, трехточечный изгиб.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-11-17

Технология применения свай в грунтах при возведении зданий и сооружений с целью решения различных технических задач известна с глубокой древности. Наибольшее распространение получили забивные сваи сплошного квадратного сечения, использование которых позволяет существенно сократить трудоемкость и стоимость, а также уменьшить сроки проведения строительных работ. Традиционно сваи армируются стальной арматурой, стоимость которой существенно влияет на стоимость конечного изделия. Одним из способов уменьшения стоимости свай может быть замена стальной арматуры композитной (например, стеклокомпозитной (АСК)). Также композитные арматурные стержни обеспечивают защиту свай от разрушающего воздействия коррозии. Разрушение железобетонных изделий и конструкций из-за коррозии стальной арматуры – одна из проблем, с которой столкнулась строительная отрасль [1]. Композитная арматура была изобретена еще в 60-х годах XX века, однако до сих пор не получила большого распространения. Связано это с тем, что пока нет государственного стандарта на сборные бетонные изделия с использованием композитной арматуры, который бы включал в себя требования к качеству продукции [2]. Достоинства и недостатки АСК подробно рассмотрены в источниках [3, 4].

Отливка бетонных свай осуществляется на производстве, поэтому возникает необходимость транспортировки готового изделия на строительную площадку. Транспортировка бетонных свай увеличивает риск появления механических повреждений в готовом изделии, приводящих к возникновению трещин, сколов, обнажающих армирующий каркас. Замена металлической арматуры композитной способствует повышению деформативности свай, что увеличивает вероятность появления трещин при транспортировке, погрузо-разгрузочных работах и забивке свай. Наличие в бетонной свае различных дефектов приводит к ухудшению прочностных характеристик строительной конструкции [5]. В настоящей статье показаны результаты экспериментальных исследований работы свай на трехточечный изгиб в лабораторных условиях, опытной забивки свай, армированных композитной арматурой, на строительной площадке; дана оценка эконо-мической эффективности замены металлической арматуры на АСК.

В качестве объекта исследования была выбрана типовая бетонная забивная свая квадратного сплошного сечения. В исследованиях рассматривались два варианта армирования:

тип I – стальной арматурой (типовая свая С40.20-3);

тип II – АСК (рис. 1).

Класс бетона по прочности на сжатие свай – В25. Параметры стального арматурного каркаса: стержень Ø10A400 (4 шт.) и спираль Ø4BpI. Параметры стеклокомпозитного арматурного каркаса: стержень Ø10АСК (4 шт.) и полимерные хомуты.



Рис. 1. Сваи железобетонные квадратного сечения на АСК

С целью верификации полученных результатов аналитических расчетов выполнены экспериментальные исследования несущей способности свай при трехточечном изгибе. Были испытаны сваи с композитным и стальным армированием. На рис. 2 представлен испытательный стенд, а в табл. 1, 2 приведены результаты испытаний. Установлено, что главными отличиями работы свай с композитным армированием от работы свай с металлическим каркасом являются:

1) пониженные прочностные характеристики свай на изгиб (потеря несущей способности в 2,4 раза);

2) появление трещин уже при начальной стадии нагружения в центральном сечении на всю высоту поперечного сечения, причинами которых являются большая изгибная деформативность свай с АСК, а также применение в конструкции арматурного каркаса полимерных хомутов. Выявлено, что значения нагрузок, при которых появляется первая трещина, при экспериментальных исследованиях (3,66 кН) в 1,34 раза выше значений, полученных при численном моделировании (2,73 кН). Это в первую очередь связано с тем, что реальная прочность бетона свай на сжатие выше планового класса прочности В25.



Рис. 2. Стенд для испытаний свай на трехточечный изгиб

Таблица 1

Результаты исследований на трехточечный изгиб свай

Степень нагружения	Нагрузка, F, кН			Прогиб, v, мм		
	Образец № 1, композитная	Образец № 2, композитная	Образец № 3, стальная	Образец № 1, композитная	Образец № 2, композитная	Образец № 3, стальная
1	3,80	3,52	3,80	0,83	0,88	0,45
2	7,60	7,20	7,20	1,95	2,09	0,97
3	10,82	9,89	11,47	3,70	3,87	1,99
4	—	—	15,23	—	—	3,11
5	—	—	19,25	—	—	4,61
6	—	—	22,50	—	—	6,77
7	—	—	25,20	—	—	8,12

Таблица 2

Результаты исследования трещин при трехточечном изгибе свай

Степень нагружения	Трещины		
	Образец № 1, композитная	Образец № 2, композитная	Образец № 3, стальная
1	2	3	4
1	Появилась трещина в центральной части на всю высоту сечения. Максимальное раскрытие 0,1 мм	Появилась трещина в центральной части на всю высоту сечения. Максимальное раскрытие 0,1 мм	Мелкие трещины (5 шт.), равномерно распределенные между опорами. Длина трещин 1/3 от высоты сечения
2	Дальнейшее раскрытие центральной трещины до 0,20–0,25 мм. Новая трещина длиной 2/3 от высоты сечения. Раскрытие до 0,15 мм	Раскрытие центральной трещины до 0,30 мм. Несколько новых трещин слева и справа от центрального сечения длиной 2/3 от высоты сечения. Раскрытие до 0,10–0,15 мм	Рост трещин до 1/2 от высоты сечения, раскрытие центральных трещин до 0,15 мм
3	Раскрытие 1-й и 2-й трещин до 0,5–0,7 мм. Падение нагрузки до 7,75 кН. Потеря несущей способности	Появление новых трещин. Раскрытие центральной трещины до 0,45–0,50 мм. Падение нагрузки до 8,8 кН. Потеря несущей способности	Центральная трещина выросла до 2/3 от высоты сечения. Ширина раскрытия 0,15–0,20 мм
4	—	—	Незначительный прирост трещин по длине (15–20 мм). Максимальная ширина раскрытия 0,20–0,25 мм

Окончание табл. 2

1	2	3	4
5	—	—	Дальнейший рост трещин. Максимальное раскрытие 0,3–0,4 мм
6	—	—	Максимальное раскрытие 0,5–0,7 мм
7	—	—	Потеря несущей способности

В рабочем положении сваи испытывают вертикальную нагрузку, работают на сжатие, а наибольшее значение имеют результаты динамических испытаний при забивке в грунт. Во время каждого удара свая получает ускорение, а затем теряет его, при этом необходимо преодолевать силы инерции сваи и динамическое сопротивление грунта.

Рассматривалась задача о вдавливании сваи, армированной композитной арматурой, под действием силы, ориентированной под углом α к оси сваи. Определялась зависимость максимально допустимой нагрузки F , не приводящей к разрушению сваи, от угла ее отклонения относительно оси сваи. Установлена сильная зависимость значения максимально допустимой силы от ее ориентации. Так, при отклонении оси приложения силы от вертикали в 1° значение критической силы падает в 12 раз по сравнению со случаем силы, приложенной вдоль оси сваи. Данный факт объясняется возникновением изгибающих нагрузок, которые приводят к появлению области растяжения и (ввиду разной сопротивляемости бетона растяжению и сжатию) способствуют резкому снижению допускаемых напряжений.

С целью опытной апробации возможности применения АСК для армирования свай была выполнена опытная забивка свай на строительной площадке. В результате установили, что сваи, армированные АСК, не отличаются от свай, армированных традиционной металлической арматурой, поскольку трещин при транспортировке свай, установке и забивке их в проектное положение не было обнаружено (рис. 3).



Рис. 3. Забивка свай, армированных АСК, на строительной площадке

Была выполнена экономическая оценка стоимости двух типов забивных свай квадратного сплошного сечения, армированных различными видами арматуры. Установлено, что при использовании композитной арматуры стоимость свай уменьшается на 12 % по сравнению с традиционной металлической арматурой, при этом наибольшие затраты на каркас (до 50 %) приходятся на композитные хомуты, стоимость которых может быть существенно снижена при их оптовой закупке.

Таким образом, был проведен анализ типа используемой арматуры в конструкции забивных свай квадратного сплошного сечения. При статическом испытании сваи на АСК уступают по прочности при изгибе и трещиностойкости сваям на стальном каркасе. Однако в ходе динамических испытаний при забивке в тяжелый грунт (суглинок и валуны) было установлено, что сваи, армированные АСК, не отличаются от свай, армированных традиционной металлической арматурой.

Композитные арматурные стержни обеспечивают защиту сваи от разрушающего воздействия коррозии. Процесс коррозии арматуры начинается с образования трещин в бетоне, а они возникают из-за механических и атмосферных воздействий. Через трещины проникает вода, соли, под действием образующейся на арматуре ржавчины начинается так называемый процесс «отстреливания бетона». Это приводит к дальнейшему оголению арматуры и разрушению конструкции. Высококачественные композитные стержни являются решением проблемы армирования и альтернативой традиционной стали, которая используется в бетонных конструкциях в агрессивной среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение композитной арматуры ROCKBAR в строительстве: метод. пособие / отв. исполнитель И.Н. Тихонов. М.: НИЦ Строительство, 2013. 58 с.
2. Уманский А.М., Беккер А.Т. Перспективы применения композитной арматуры // *Вестник инженерной школы ДВФУ*. 2012. № 2 (11). С. 7–13.
3. Рахронов А.Д., Соловьев Н.П. Предложения по применению композитной арматуры в каркасах зданий // *Вестник СибАДИ*. 2013. Вып. 5 (33). С. 69–74.
4. Имомназаров Т.С., Аль Сабри Сахар А.М., Дирие М.Х. Применение композитной арматуры // *Системные технологии*. 2018. № 27. С. 24–29.
5. Дедков В.И. Исследование влияния технологических и монтажных факторов на долговечность забивных свай в агрессивных грунтовых средах // *Повышение долговечности строительных конструкций в агрессивных средах: Тез. докл. науч.-техн. семинара / отв. ред. В.В. Яковлев*. Уфа: Башк. правл. НТО стройиндустрии, 1987. С. 56–57.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Курятников Ю.Ю. Применение стеклокомпозитной арматуры для армирования забивных свай квадратного сечения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 3 (27). С. 11–17.

**USE OF GLASS-COMPOSITE REINFORCEMENT
FOR PRODUCING SQUARE-SECTIONED PILES*****Yu.Yu. Kuryatnikov****Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The possibility of using glass-fiber reinforced concrete in the design of square-section pile driving is considered. The results of experimental driving of piles reinforced with composite reinforcement are presented. It has been established that piles reinforced with composite reinforcement do not differ in their properties in the working position from piles reinforced with steel reinforcement. The dependence of the maximum allowable force on its orientation during pile driving has been established. The economic effect of replacing steel reinforcement with composite reinforcement has been determined, resulting in a decrease in the cost of the final product.

Keywords: driving piles, fiberglass reinforcement, strength and crack resistance tests, three-point bending.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Kuryatnikov Yu.Yu. Use of glass-composite reinforcement for producing square-sectioned piles // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 3 (27), pp. 11–17.

УДК 624.075**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ
СЖАТО-ИЗОГНУТОЙ КОЛОННЫ НА ЕЕ УСТОЙЧИВОСТЬ*****С.Л. Субботин, Т.Р. Баркая, А.В. Пронина****Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Субботин С.Л., Баркая Т.Р., Пронина А.В., 2025

Аннотация. В статье представлено сопоставление расчетов сжато-изогнутой ступенчатой колонны промышленного здания по методике СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» и по модели, учитывающей деформирование колонны методами теории устойчивости в строительной механике.

Ключевые слова: колонна промышленного здания, устойчивость, внецентренное сжатие, деформационный расчет.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-17-25

Расчет ступенчатой колонны (рис. 1) по нормативной методике выполняется в соответствии с принципами СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» [1]. Он основан на определении коэффициентов расчетной длины сжатых стержней по модели центрально сжатого стержня. Учет действия изгибающих моментов и поперечной нагрузки производится с помощью дополнительных коэффициентов и таблиц. Сначала определяются расчетные длины участков колонн, затем выполняется проверка устойчивости с учетом внецентренности приложения крановой нагрузки и горизонтальной тормозной нагрузки.

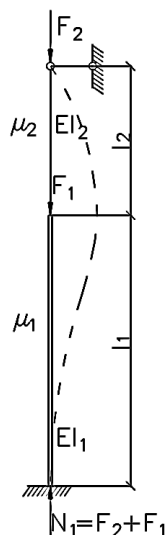


Рис. 1. Расчетная схема колонны (составлено авторами)

В программно-вычислительном комплексе (ПВК) SCAD Office была создана расчетная модель деформационного отсека промышленного здания [2]. Из ее расчета были получены исходные данные, необходимые для вычислений по СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции»: $F_1 = 73,83$ т; $F_2 = 45,9$ т; $l_1 = 9,41$ м; $l_2 = 6,47$ м; $EI_1 = 8\,337$ тм² (двутавр широкополочный по ГОСТ 26020-83 40Ш2); $A_1 = 141,6$ см²; $EI_2 = 6\,416$ тм² (двутавр широкополочный по СТО АСЧМ 20-93 40Ш1); $A_2 = 112,91$ см²; $T = 1,52$ т; $e = 1,1$ м.

Вертикальная нагрузка для первого и второго участка колонны (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} N_1 &= F_1 + F_2 = 73,83 + 45,90 = 119,73 \text{ т;} \\ N_2 &= F_2 = 45,9 \text{ т.} \end{aligned} \quad (1)$$

Определение коэффициентов расчетной длины μ_1 первого и второго участков колонны выполняется через μ_{11} и μ_{12} по табл. И.3 приложения СП 16.13330.2017 [1] «Коэффициенты расчетной длины для одноступенчатых колонн с неподвижным шарнирно-опертым верхним концом» в зависимости от $\frac{l_2}{l_1} = 0,688$ и $\frac{l_2}{l_1} = 0,770$ методом интерполяции (рис. 2):

$$\begin{aligned} \mu_{11} &= 0,815 - \text{величина } \mu_1 \text{ при } F_2 = 0; \\ \mu_{12} &= 1,400 - \text{величина } \mu_1 \text{ при } F_1 = 0. \end{aligned}$$

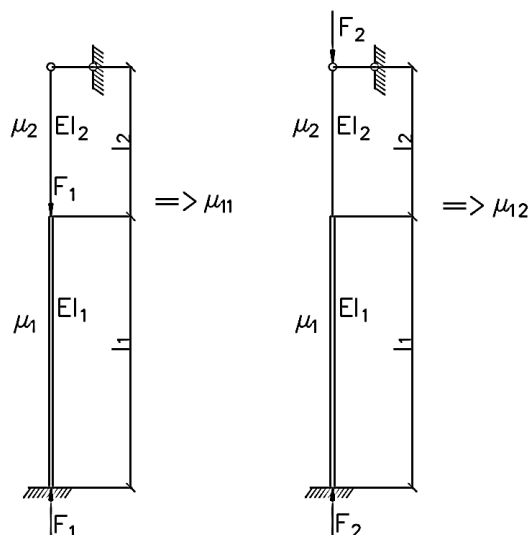


Рис. 2. Расчетные схемы для определения коэффициентов расчетной длины по табл. И.3 [1] (составлено авторами)

Расчет на прочность сжато-изгибаемых (внецентренно-сжатых) колонн из стали с нормативным сопротивлением $R_{yn} = 306,5 \text{ Н/мм}^2 \leq 440 \text{ Н/мм}^2$, которые не подвергаются непосредственному воздействию динамических нагрузок (при напряжениях $\tau < 0,5R_s$ и $\sigma = N/A_n > 0,1R_y$), выполняют только при значении приведенного относительного эксцентриситета $m_{ef} > 20$ и отсутствии ослабления сечения.

Расчет на устойчивость для верхнего участка с учетом выражения (1) при $N_2 = F_2 = 45,9 \text{ т}$ выглядит следующим образом:

$$i_2 = \sqrt{\frac{J_2}{A_2}} = \sqrt{\frac{EJ_2}{EA_2}} = \sqrt{\frac{6416}{2,1 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 112,91 \cdot 10^{-4}}} = 0,164; \quad (2)$$

$$\lambda_2 = \frac{\mu_2 l_2}{i_2} = \frac{3,0 \cdot 6,47}{0,164} = 118,354; \quad (3)$$

$$\bar{\lambda}_2 = \lambda_2 \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 118,354 \sqrt{\frac{3250}{2,1 \cdot 10^6}} = 4,656; \quad (4)$$

$$m_2 = \frac{\epsilon A_2}{W_{c2}} = \frac{(1,1 \cdot 100) \cdot 112,91}{1595,61} = 7,784 \Rightarrow 5 < m_2 \leq 20. \quad (5)$$

Для профиля 40Ш1

$$\frac{Af_2}{A_{w2}} = \frac{(299 \cdot 12,5)}{(383 - 12,5 \cdot 2) \cdot 9,5} = 1,099 > 1; \quad (6)$$

$$\Rightarrow \eta_2 = 1,4 - 0,02\bar{\lambda}_2 = 1,4 - 0,02 \cdot 4,656 = 1,307; \quad (7)$$

$$m_{ef2} = \eta_2 m_2 = 1,307 \cdot 7,784 = 10,174. \quad (8)$$

При $\bar{\lambda}_2 = 4,656$ и $m_{ef2} = 10,174$ по табл. Д.3 СП 16.133330.2017 $\varphi_{0,991} = 0,091$.

Условие устойчивости выполняется:

$$\frac{N_2}{\varphi_{ef} A_2 R_y \gamma_c} = \frac{(45,9 \cdot 1000)}{0,091 \cdot 112,91 \cdot 3250 \cdot 1} < 1. \quad (9)$$

Расчет на устойчивость для нижнего участка аналогичен формулам (1)–(9):

$$N_1 = F_1 + F_2 = 73,83 + 45,90 = 119,73 \text{ т};$$

$$i_1 = \sqrt{\frac{J_1}{A_1}} = \sqrt{\frac{E J_1}{E A_1}} = \sqrt{\frac{8\,337}{2,1 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 141,6 \cdot 10^{-4}}} = 0,167;$$

$$\lambda_1 = \frac{\mu_1 l_1}{i_1} = \frac{1,211 \cdot 9,41}{0,167} = 68,237;$$

$$\bar{\lambda}_1 = \lambda_1 \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 68,237 \sqrt{\frac{3\,250}{2,1 \cdot 10^6}} = 2,684;$$

$$m_1 = \frac{e A_1}{W_{c1}} = \frac{(1,1 \cdot 100) \cdot 141,6}{2\,025,51} = 7,690 \Rightarrow 5 < m_1 \leq 20.$$

Для профиля 40Ш2

$$\frac{A_{f1}}{A_{w1}} = \frac{(300 \cdot 16)}{(392 - 16 \cdot 2) \cdot 11,5} = 1,159 > 1;$$

$$\Rightarrow \eta_1 = 1,4 - 0,02 \bar{\lambda}_1 = 1,4 - 0,02 \cdot 2,684 = 1,346;$$

$$m_{ef1} = \eta_1 m_1 = 1,346 \cdot 7,690 = 10,351.$$

При $\bar{\lambda}_1 = 2,684$ и $m_{ef1} = 10,351$ по табл. Д.3 СП 16.133330.2017 $\rightarrow \varphi_{e1} = 0,113$.

$$\frac{N_1}{\varphi_{e1} A_1 R_y \gamma_c} = \frac{(119,73 \cdot 1\,000)}{0,113 \cdot 141,6 \cdot 3\,250 \cdot 1} < 1.$$

Условие устойчивости выполняется для обоих участков.

Расчет по деформационной модели сжато-изогнутой колонны ведется на основании решения методами строительной механики [3–6] (рис. 3). При решении задач строительной механики вводится упрощенная конструкция, освобожденная от факторов, несущественно влияющих на ее работу в целом.

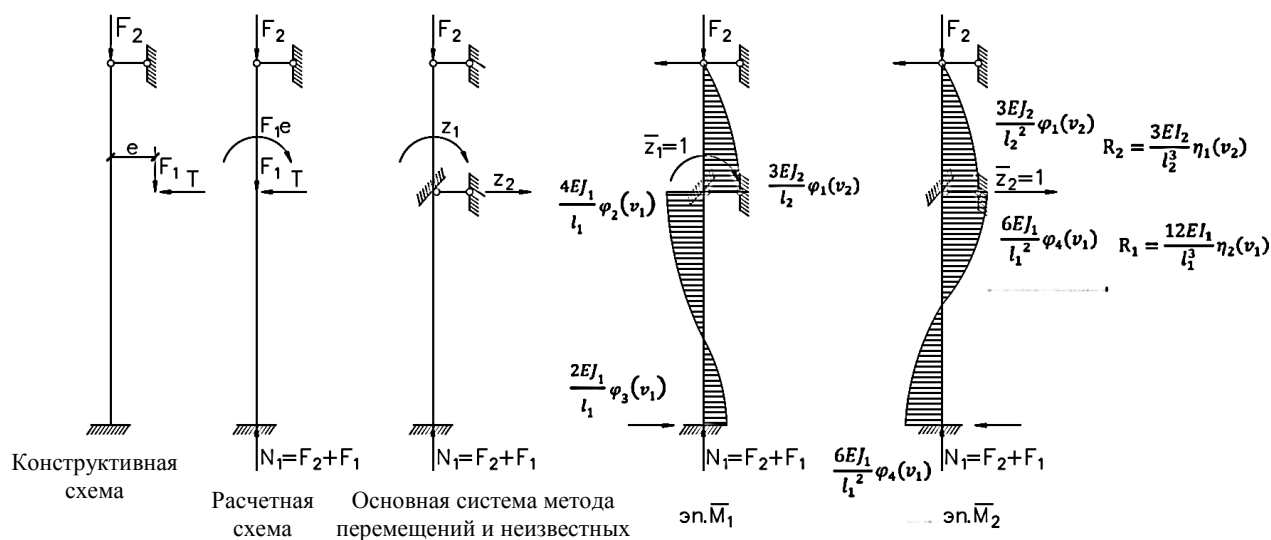


Рис. 3. Расчетные схемы и единичные эпюры сжато-изогнутой колонны (составлено авторами)

Вычислим расчетные длины и соответствующие параметры:

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{N_1 + F_2}{N_1}} = 0,547; \quad (10)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{(F_1 + F_2) l_1^2}{E I_1}} = 1,128.$$

$$v_2 = \frac{l_2}{l_1} \sqrt{\frac{l_1}{l_2} \frac{F_2}{(F_1 + F_2)}} v_1 = \alpha_1 v_1 = 0,547. \quad (11)$$

$$\mu_1 = \frac{\pi}{v_1} = 2,785. \quad (12)$$

При этом μ_2 берется не более $\mu_2^{\max} = 3$. Принимаем $\mu_2 = 3$. С учетом вычисленных коэффициентов приведения μ_1 и μ_2 получим расчетные длины:

$$l_{\text{расч}1} = \mu_1 l_1 = 26,21 \text{ м}; \quad (13)$$

$$l_{\text{расч}2} = \mu_2 l_2 = 19,41 \text{ м}.$$

На основании принципа независимого действия сил окончательную эпюру моментов можно получить путем сложения в характерных сечениях ординат грузовой и исправленных единичных эпюр (рис. 4):

$$M_{\text{ок}} = \bar{M}_1 z_1 + \bar{M}_2 z_2 + M_p. \quad (14)$$

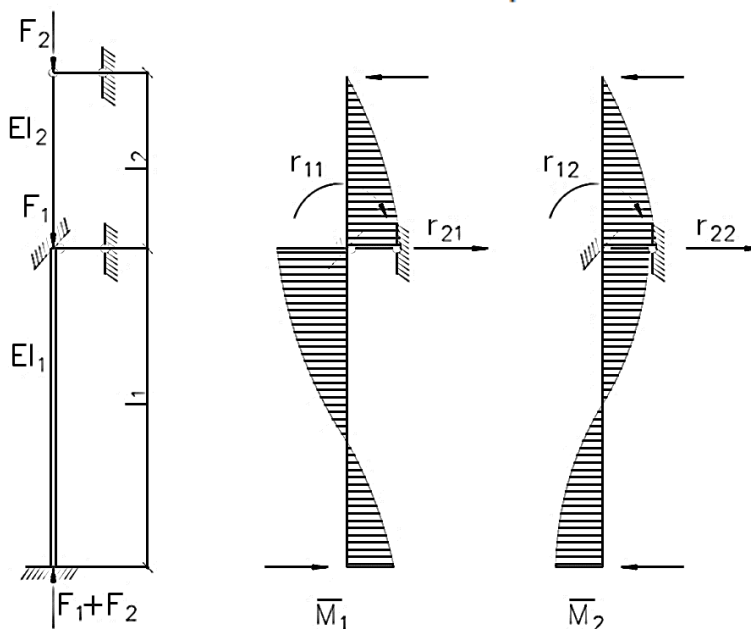


Рис. 4. Коэффициенты реактивных моментов, перемещений и единичные эпюры (составлено авторами)

Величины z_1 и z_2 находятся из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} r_{11} z_1 + r_{12} z_2 + R_{1p} = 0; \\ r_{21} z_1 + r_{22} z_2 + R_{2p} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

При достижении нагрузки критического значения колонна теряет устойчивость и изгибается, что сопровождается линейными и угловыми смещениями ее узлов. Параметры устойчивости при этом становятся критическими.

Система уравнений содержит тригонометрические функции $\varphi_2(v_{11})$, $\varphi_4(v_{11})$, $\eta_2(v_{11})$, зависящие от параметра v сжатой колонны.

С учетом выражений (10)–(13) значения функций, входящих в систему уравнений для сжато-изогнутых стержней, будут следующими:

$$\varphi_1(v_2) = \frac{v_2^2 \operatorname{tg} v_2}{3(\operatorname{tg} v_2 - v_2)} = 0,980; \quad (16)$$

$$\eta_1(v_2) = \frac{v_2^3}{3(\operatorname{tg} v_2 - v_2)} = 0,880; \quad (17)$$

$$\varphi_2(v_1) = \frac{v_1(tg v_1 - v_1)}{8 tg v_1 (tg \frac{v_1}{2} - \frac{v_1}{2})} = 0,957; \quad (18)$$

$$\varphi_3(v_1) = \frac{v_1(v_1 - \sin v_1)}{4 \sin v_1 (tg \frac{v_1}{2} - \frac{v_1}{2})} = 1,022; \quad (19)$$

$$\varphi_4(v_1) = \frac{(\frac{v_1}{2})^2 tg \frac{v_1}{2}}{3(tg \frac{v_1}{2} - \frac{v_1}{2})} = 0,979; \quad (20)$$

$$\eta_2(v_1) = \frac{(\frac{v_1}{2})^3}{3(tg \frac{v_1}{2} - \frac{v_1}{2})} = 0,873; \quad (21)$$

$$r_{11} = \frac{3EI_2}{l_2} \varphi_1(v_2) + \frac{4EI_1}{l_1} \varphi_2(v_1); \quad (22)$$

$$r_{11} = 2\,975 \varphi_1(v_2) + 3544 \varphi_2(v_1) = 6\,306,258 \text{ тм};$$

$$r_{12} = r_{21} = \frac{3EI_2}{l_2} \varphi_4(v_2) - \frac{12EI_1}{l_1^3} \varphi_4(v_1); \quad (23)$$

$$r_{12} = r_{21} = 460 \varphi_4(v_2) - 565 \varphi_4(v_1) = -102,163 \text{ тм};$$

$$r_{22} = \frac{3EI_2}{l_2^3} \eta_1(v_2) + \frac{12EI_1}{l_1^3} \eta_2(v_1); \quad (24)$$

$$r_{22} = 71,07 \eta_1(v_2) + 120 \eta_2(v_1) = 167,260 \text{ тм};$$

$$Det = r_{11} r_{22} - r_{12}^2 = 0; \quad (25)$$

$$R_{1p} = -F_1 e = -81,21 \text{ тм}; \quad (26)$$

$$R_{2p} = T = 1,52 \text{ т.}$$

С учетом найденных по формулам (16)–(26) величин получим из выражения (15) ординаты для единичных моментов:

$$z_1 = \frac{\begin{vmatrix} -R_{1p} & r_{21} \\ -R_{2p} & r_{22} \end{vmatrix}}{Det} = \frac{R_{2p} \cdot r_{21} - R_{1p} \cdot r_{22}}{Det}; \quad (27)$$

$$z_1 = \frac{1,52 \cdot (-102,163) - (-81,21) \cdot 167,260}{1\,044\,345,660} = 0,012\,9;$$

$$z_2 = \frac{\begin{vmatrix} r_{11} & -R_{1p} \\ r_{21} & -R_{2p} \end{vmatrix}}{Det} = \frac{R_{1p} \cdot r_{21} - R_{2p} \cdot r_{11}}{Det}; \quad (28)$$

$$z_2 = \frac{-81,21 \cdot (-102,163) - 1,52 \cdot 6306,258}{1\,044\,345,660} = -0,0012.$$

Эпюра изгибающих моментов (14) при найденных по выражениям (27) и (28) значениях z_1 и z_2 строится в основной системе метода перемещений, где имеется силовое воздействие. В данном случае внешние нагрузки действуют в сечениях, где введены связи, т.е. при $M_p = 0$ (рис. 5).

Проверяем поперечное сечение колонны по условию

$$\sigma_{max} = \frac{N}{A} + \frac{M}{W_x} \leq R_y \gamma_c,$$

или

$$\frac{N}{AR_y \gamma_c} + \frac{M}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1. \quad (29)$$

Для нижнего участка

$$\frac{N_1}{A_1 R_y \gamma_c} + \frac{M_1}{W_{x1} R_y \gamma_c} = \frac{119,73 \cdot 1\,000}{141,91 \cdot 3\,250 \cdot 1} + \frac{43,086 \cdot 100\,000}{2\,025,51 \cdot 3250 \cdot 1} = 0,260 + 0,655 = 0,914 < 1.$$

Для верхнего участка

$$\frac{N_2}{A_2 R_y \gamma_c} + \frac{M_2}{W_{x2} R_y \gamma_c} = \frac{45,9 \cdot 1\,000}{112,91 \cdot 3\,250 \cdot 1} + \frac{37,068 \cdot 100\,000}{1\,595,61 \cdot 3\,250 \cdot 1} = 0,125 + 0,715 = 0,840 < 1.$$

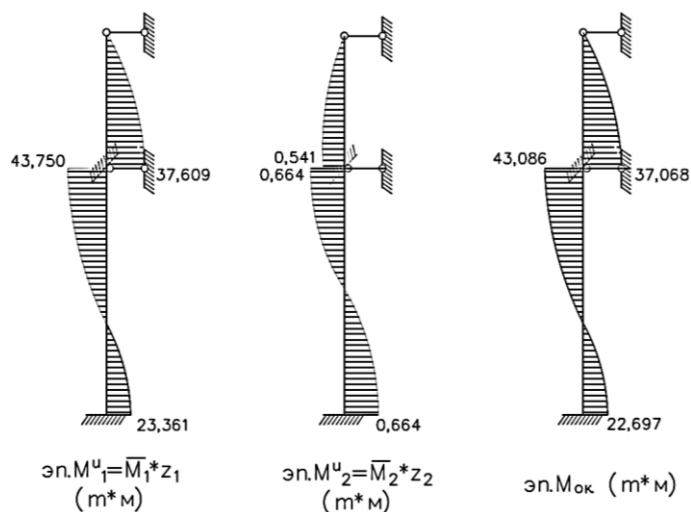


Рис. 5. Окончательная эпюра момента (составлено авторами)

Результаты проверок условия (29) получились весьма близкими к результатам, полученным из расчета по СП 16.133330.2017 «Стальные конструкции» и в ПВК SCAD Office.

На основе проведенного анализа можно сделать выводы. В целом влияние деформации на поведение сжато-изогнутых колонн является важным аспектом, который следует принимать во внимание при их проектировании. Исследования показывают, что использование расчета по деформированному состоянию способствует сокращению погрешности, которая может достигать 15–20 % при расчетах классическим методом. Это подчеркивает важность более тщательного анализа. Учет деформационных характеристик колонн (изгибных деформаций) позволяет лучше моделировать их поведение под нагрузкой. Включение данного расчета повысит верность прогнозов несущей способности колонн.

Для используемых материалов максимальное напряжение в колонне, согласно критерию прочности Мизеса, не превышает допустимого. Такая модель обеспечивает надежность опорной конструкции в эксплуатации, помогает избежать лишних затрат на материалы, делая проектирование более экономичным.

Основные факторы, влияющие на надежность сжато-изогнутых колонн, – это прочность материала, форма и условия их крепления, которые помогают колоннам справляться с нагрузками и сохранять свою целостность. Выбор оптимальных геометрических параметров снижает риск локальных разрушений, а материал с высокой прочностью обеспечивает большую устойчивость к изгибу, сжатию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 16.133330.2017. Свод правил. Стальные конструкции: актуализированная редакция СНиП II-23-81*: утвержден Минстроем России 27.02.2017 № 126/пр: // Меганорм. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293745/4293745484.pdf> (дата обращения: 30.06.2025).
2. Теплых А.В., Смирнов С.А., Горбушко М.А., Ерофеев И.М., Сидоров А.С. Инженерные технологии построения расчетных моделей и анализа результатов в системе SCAD Office: модели металлокаркасов. URL: https://www.cadmater.ru/magazin/articles/cm_35_scad_office.html (дата обращения: 30.06.2025).

3. Клейн Г.К., Рекач В.Г., Розенблат Г.И. Руководство к практическим занятиям по курсу строительной механики. Динамика и устойчивость: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1972. 320 с.
4. Киселев В.А. Строительная механика. Специальный курс. Динамика и устойчивость сооружений: учебник для вузов. 3-е изд., испр. и доп. М.: Стройиздат, 1980. 616 с.
5. Металлические конструкции: учебник / Ю.И. Кудишин [и др.]. 13-е изд., испр. М.: Академия, 2011. 688 с.
6. Алексеев А.А., Ведерников В.Н. Строительная механика: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2016. 116 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

БАРКАЯ Темур Рауфович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

ПРОНИНА Анастасия Владимировна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: pronina_anastasia_18@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Субботин С.Л., Баркая Т.Р., Пронина А.В. Оценка влияния деформируемости сжатой изогнутой колонны на ее устойчивость // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 3 (27). С. 17–25.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF DEFORMABILITY OF COMPRESSION-CURVED COLUMN ON ITS STABILITY

S.L. Subbotin, T.R. Barkaya, A.V. Pronina
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The paper compares the calculation of a compressed curved stepped column of an industrial building according to the methodology of SP 16.13330.2017 "Steel Structures" and according to the model that takes into account the deformation of the column by methods of stability theory in structural mechanics.

Keywords: industrial building column, stability, eccentricity, deformation calculation.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

BARKAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

PRONINA Anastasia Vladimirovna – Master's Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: pronina_anastasia_18@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Subbotin S.L., Barkaya T.R., Pronina A.V. Assessment of the influence of deformability of compression-curved column on its stability // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 3 (27), pp. 17–25.

УДК 624.139

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ УСЛОВИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

В.И. Трофимов

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Трофимов В.И., 2025

Аннотация. В статье рассмотрена актуальная проблема повышения эффективности использования тяжелого бетона в транспортном и оборонном строительстве на Севере. Дана классификация областей применения тяжелого бетона с учетом его работы в сложных природно-климатических и грунтовых условиях строительства на Севере. Показано, что для повышения эффективности работы бетонных изделий и конструкций необходимо использовать модифицированные и дисперсно-армированные бетоны, а также многослойные бетонные изделия и конструкции с широким применением композитных материалов.

Ключевые слова: тяжелый бетон, физико-механические свойства, транспортное и оборонное строительство, армирование, модифицирование.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-25-35

Эффективное освоение уникальных, стратегически важных для нашей страны нефтяных месторождений, расположенных в удаленных районах Арктической зоны, и надежная их защита невозможны без применения новых строительных материалов, в частности бетонов нового поколения, и технологических решений на базе их использования.

Структурная схема основных разновидностей тяжелого бетона, широко применяемых в строительстве, представлена на рис. 1. Как видно, тяжелый бетон отличается хорошими физико-механическими свойствами и находит широкое применение в различных отраслях народного хозяйства.

Решение вопроса быстрее вовлечения арктических месторождений в народно-хозяйственную деятельность с учетом обеспечения их надежной защиты было отражено в специальной государственной программе, принятой Правительством РФ для реализации до 2030 года. При этом перспективы развития важнейшей нефтегазовой отрасли в Арктической зоне напрямую связаны с реализацией комплекса инфраструктурных проектов: строительством дорог и нефтепроводов, нефтяных и газовых резервуаров,

мостов, площадок под насосные станции и др. [1]. Все это требует больших объемов тяжелого бетона с особыми свойствами (рис. 2).

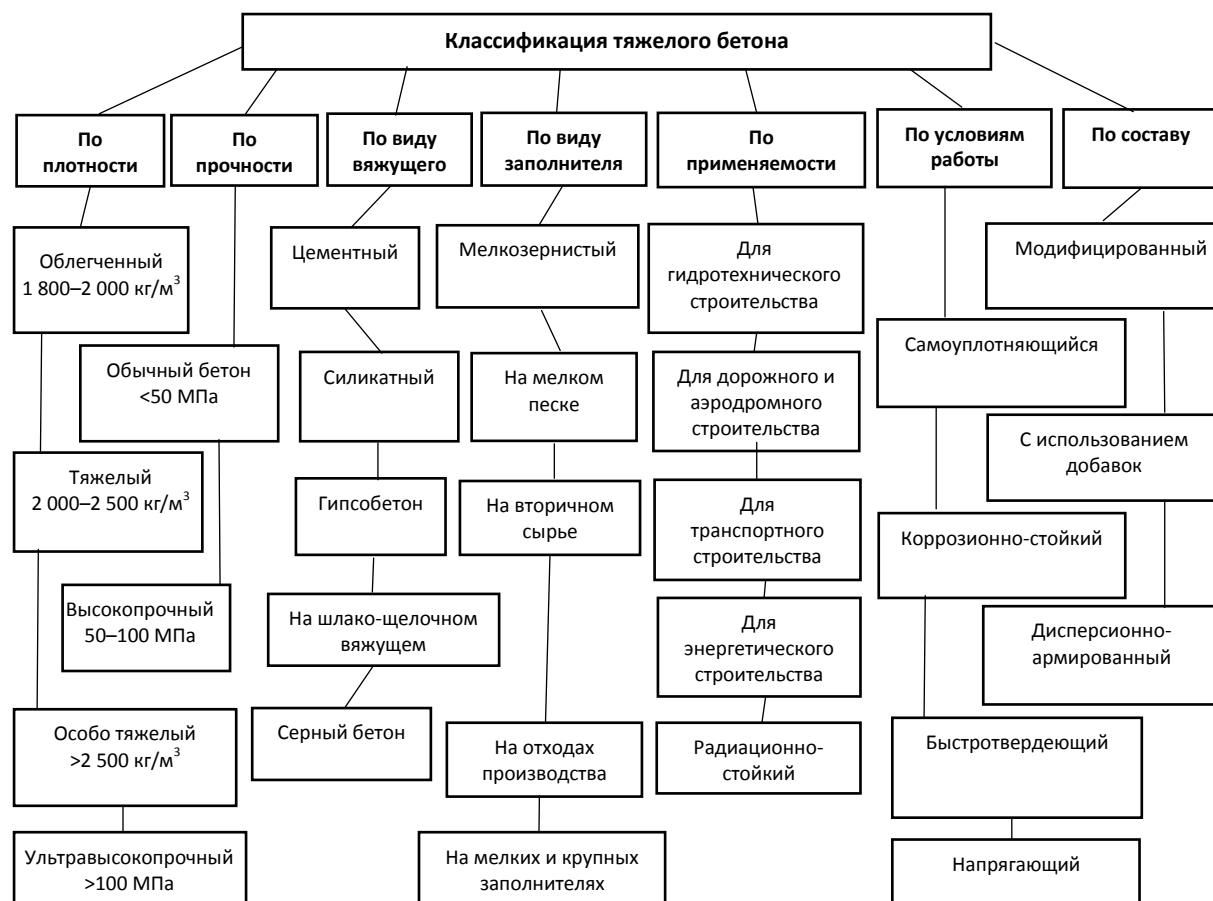


Рис. 1. Структурная схема классификации тяжелого бетона

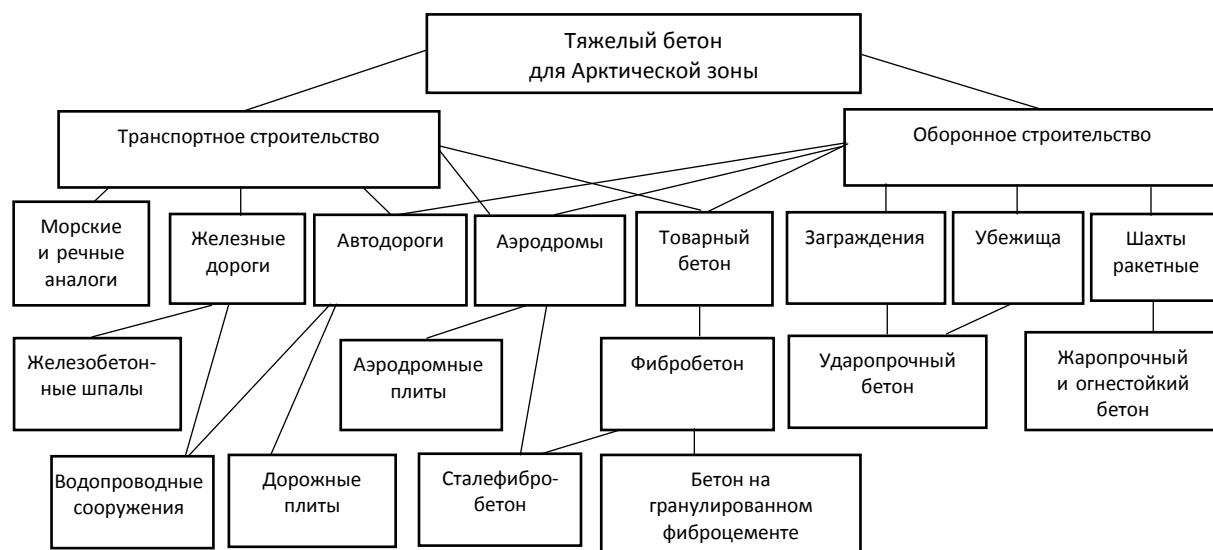


Рис. 2. Структурная схема применения тяжелого бетона в Арктической зоне

Из структурных схем применимости тяжелого бетона (см. рис. 1, 2), видно, что в некоторых областях строительства (дорожном, аэродромном, энергетическом и др.) широко используются модифицированный товарный бетон, железобетонные изделия и конструкции (дорожные и аэродромные плиты, водопропускные трубы и лотки, сваи, опоры ЛЭП и пр.), которые имеют двойное назначение, т.е. находят применение как в гражданском строительстве, так и в оборонной отрасли.

Особые неблагоприятные климатические условия арктических территорий сопровождаются широким распространением высокольдистых (в особенности тонкодисперсных засоленных) грунтов, которые могут находиться в пластично-мерзлом состоянии, являются наиболее сложными и опасными с точки зрения строительства. Такие грунты в процессе оттаивания переходят в структурно неустойчивое состояние, что приводит к разрушению бетонного покрытия дорог и площадок под различные сооружения [2].

В настоящее время особенно востребован дисперсно-армированный и модифицированный тяжелый бетон для применения на арктических территориях при транспортном и оборонном строительстве (см. рис. 2).

Таким образом, другим важным вопросом, который отражен в специальной государственной программе по экономическому развитию Арктической зоны РФ, является разработка комплекса мер по надежной защите нефтегазовых сооружений на осваиваемых территориях, для чего необходимо возведение специальных инженерно-строительных сооружений в целях надежного функционирования оборонных объектов (аэродромов, дорог, радаров, пусковых ракетных установок и др.).

Без применения специальных эффективных видов монолитного бетона и железобетонных изделий в больших объемах в суровых природно-климатических условиях строительства не обойтись.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ И ГРУНТОВЫЕ УСЛОВИЯ РАБОТЫ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

На состоявшемся 18 апреля 2024 года расширенном заседании Комитета Государственной Думы по развитию Дальнего Востока и Арктики был рассмотрен серьезный вопрос «О совершенствовании принимаемых мер по проектированию и строительству объектов капитального строительства в Арктической зоне Российской Федерации». Было отмечено, что деградация многолетней (вечной) мерзлоты в условиях изменяющегося климата пагубно влияет на безопасность эксплуатации жилого фонда, эксплуатационную надежность и промышленную безопасность зданий, сооружений и линейных объектов [3].

В течение года наблюдаются значительные колебания температуры воздуха по арктическим зонам. В зимний период температура опускается до -50°C , а в короткий период лета поднимается до $+30^{\circ}\text{C}$. При этом широко распространены вечномерзлые пылеватые высокольдистые и агрессивные засоленные грунты, опасные для строительства и эксплуатации конструкций и сооружений: фундаментов, дорожных и аэродромных плит, железобетонных свай, опор ЛЭП, мостовых опор и др. Однако вопрос использования пылеватых и мелких песков в производстве эффективных бетонных изделий до конца не решен.

В то же время необходимо учитывать, что на территории России темпы изменения климата превышают средние показатели по планете, особенно это характерно для арктических зон. Озабоченность вызывает и воздействие климатических изменений на

транспортную инфраструктуру в районах распространения вечной мерзлоты, поскольку это сказывается на снижении несущей способности грунтов и развитии деструктивных геоморфологических процессов, которые могут привести, а в ряде регионов уже привели, к нарушению эксплуатационных условий и разрушению транспортных объектов с применением тяжелого бетона [4].

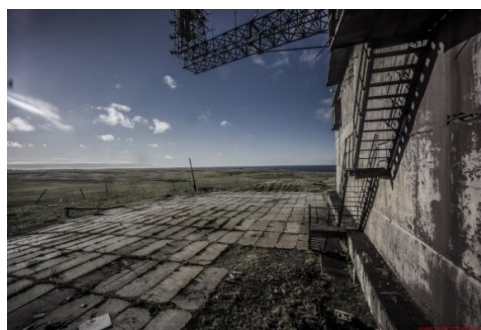
ТРЕБОВАНИЯ К ТЯЖЕЛОМУ БЕТОНУ С УЧЕТОМ ЕГО РАБОТЫ В СЛОЖНЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ И ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЯХ

Проблеме повышения морозостойкости и коррозионной стойкости бетона уделяется пристальное внимание в отечественной и зарубежной литературе. При этом должным образом не рассматривается то, что ряд бетонных конструкций подвергается одновременному действию циклических знакопеременных температур и нагрузок. Это бетонные элементы гидротехнических, промышленных, сельскохозяйственных конструкций и сооружений, расположенных в поверхностных слоях грунта или в зоне попеременного увлажнения и высушивания. Исследований, посвященных такой проблеме, крайне мало. В частности, в работе [5] проанализировано повышение стойкости тяжелых бетонов к циклическим воздействиям в суровых условиях эксплуатации.

Свайные и столбчатые железобетонные фундаменты в подполье зданий, а особенно в зоне промерзания – оттаивания, подвержены физическому износу – коррозии. В результате действия техногенных вод, насыщенных хлоридами, сульфатами, уголекислотой, щелочами и другими химическими соединениями, арматура и бетон фундамента подвергаются коррозии, что приводит к потере несущей способности (рис. 3а) [6]. Дорожные плиты также подвержены разрушению в процессе эксплуатации в арктических зонах (рис. 3б) [7].



а



б

Рис. 3. Примеры деструкции бетона: а – разрушение ростверков и свай здания из-за коррозии бетона; б – деструкция дорожных плит площадки бывшей радиолокационной станции (поселок Амдерма, полуостров Рыбачий)

Для защиты бетона от коррозионного разрушения рекомендуется повышать плотность бетона, принимать особые добавки и специальные цементы: пуццолановый, сульфатостойкий и др.

ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БЕТОНА

В настоящее время основными путями улучшения эксплуатационных свойств бетона являются его модифицирование с использованием высококачественных сырьевых компонентов, соответствующих добавок, дисперсного армирования, микронаполнителей и

модифицирование с применением оптимизированных составов смеси и оптимальных технологических режимов при изготовлении бетонных изделий или непосредственно в условиях строительства.

Один из способов повышения прочности бетона – армирование. Непрерывный и дисперсный виды армирования бетонной матрицы способствуют двух- или трехмерному ее упрочнению, позволяют принципиально изменять свойства цементного камня, обеспечивая улучшенные физико-механические свойства (повышение трещино-стойкости, особенно при действии ударных и динамических нагрузок, снижение абразивного износа, повышение водонепроницаемости, морозостойкости и др.), при использовании, например, некондиционных тонкодисперсных песков [8].

В ТвГТУ предложено и обосновано применение новой композитной и металлической фибры повышенного сцепления: патент № 2490406 – микросетки; патент № 2582254 – многоанкерная фибра; патент № 2601705 – двухветвевая фибра; патент № 2806090 – крученая фибра.

Кроме этого, современные исследования особенностей работы фибробетона доказали существенное влияние метода полиармирования на улучшение его физико-механических свойств. Метод полиармирования заключается в использовании, например, двух различных видов фибры, отличающихся размерами и формой [9].

Тем не менее возникают определенные трудности при дозировании и приготовлении бетонной смеси, если в ее состав включена фибра, особенно волокнистая, низко модульная.

В данной связи предложено два новых технических решения: использовать вместо мягких волокон более жесткие композитные микросетки (патент № 2490406), а также применять новый способ приготовления фибробетонной смеси (патент № 2725054), при котором на первом этапе отдельно дозируют мелкий заполнитель, воду и подают в смеситель, а на втором этапе в приготовленную смесь вводят вместе фибру и цемент в виде готовых дозированных растворимых фиброцементных гранул с конкретно заданным их содержанием. При этом в состав фиброцементных гранул дополнительно может вводиться добавка. Использование для бетонов нового материала – гранулированного фиброцемента, предложенного в ТвГТУ, позволит упростить и сократить время приготовления бетонных смесей, отказаться от доставки и хранения фибры, добавок, которые уже включены в состав гранул, что особенно важно при выполнении сложных ремонтных работ в условиях арктических зон [10].

Другой метод улучшения эксплуатационных свойств бетона связан с изучением физико-химических процессов гидратационного твердения портландцемента и структурообразования цементного камня бетонов с различными пластифицирующими и активными минеральными добавками. Установлено, что для повышения морозостойкости бетонов используют в основном два способа: повышение плотности цементного камня бетона с уменьшением объема макропор и их водопроницаемости (например, путем введения в смесь поликарбоксилатных суперпластификаторов и активных минеральных добавок); создание в цементном камне бетона резервных воздушных пор (4–8 % от его объема) с обеспечением толщины прослоек между соседними порами не более 0,025 мм (например, путем введения воздухововлекающих добавок). Однако такой метод, несмотря на реальное повышение морозостойкости бетона, снижает структурную прочность цементной матрицы. В этом случае для устранения недостатка рекомендуется вводить в состав смеси вместе с воздухововлекающей добавкой и фибру.

Стойкость бетонов к физико-механическим воздействиям в значительной степени зависит от вида новообразований цементного камня, параметров микроструктуры и их стабильности. Управлять фазовым составом, структурообразованием и плотностью структуры цементного камня бетона для повышения его стойкости к внешним циклическим воздействиям в условиях Арктической зоны можно за счет введения в бетонную смесь суперпластифицирующих (водоредуцирующих) и активных минеральных добавок. Таким образом, особую ценность представляет проведение комплексных исследований по формированию плотной и стабильной во времени микроструктуры, состоящей преимущественно из низкоосновных гидросиликатов и обеспечивающей повышенную стойкость цементного камня бетона при циклических физико-механических воздействиях [5]. По результатам исследований было установлено, что в комплексной добавке, состоящей из пластификатора и микрокремнезема, замена пластификатора на основе нафталинформальдегида пластификатором на основе поликарбоксилата обеспечивает увеличение марки по морозостойкости бетона для дорожных покрытий с F₂₃₀₀ до F₂₅₀₀. Это происходит вследствие сохранения при циклических воздействиях «замораживание – оттаивание» в цементном камне слабозакристаллизованных низкоосновных гидросиликатов кальция пластинчатого строения за счет снижения содержания в нем портландита.

В ТвГТУ была проведена работа, цель которой состояла в обосновании метода улучшения структурно-механических свойств дорожного бетона на основе комплексного использования способов непрерывного и дисперсного полиармирования бетонной матрицы новыми композитными сетчатыми элементами для производства дорожных плит повышенной эксплуатационной надежности [11]. На первом этапе исследований была решена задача по оценке влияния работы под нагрузкой непрерывной композитной сетки (установленной в бетонной матрице с учетом размера ее отверстий) на прочность [12]. Следующий этап исследований заключался в определении подходящей прочности на изгиб и сжатие в зависимости от процентного содержания композитной фибры в комплексе с композитной сеткой, имеющей ранее выявленный оптимальный размер ячеек. Результаты выполненных испытаний показали эффективность совместного использования композитных микросеток двух размеров для дисперсного полиармирования бетонной матрицы в комплексе с применением непрерывной композитной сетки для повышения показателей прочности на изгиб и сжатие.

Одним из достоинств новой фибры повышенного сцепления является то, что микросетки (патент № 2490406) и многоанкерная фибра (патент № 2582254) могут быть легко изготовлены (нарезаны) из обычных сеток (стальных или полимерных и композитных), которые широко используются в различных отраслях промышленности. При этом могут быть использованы и отходы производства сеток.

В случае работы бетона с восприятием динамических нагрузок предлагается использовать крученую фибру (патент № 2806090) (рис. 4).

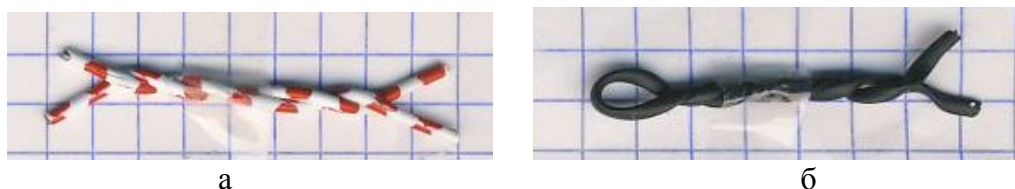


Рис. 4. Крученая композитная фибра: а – четыреханкерная;
б – двуханкерная с дополнительным кольцевым анкером

В ТвГТУ также ведутся работы по совершенствованию конструкции дорожной плиты с целью повышения ее трещиностойкости на основе использования слоев из готовых композитных плит (патент № 201315, патент № 2739818) [13].

Автомобильные дороги пересекают на своем пути множество водных преград, к которым относятся малые водотоки, включающие ручьи, малые реки с площадью водосборного бассейна не более 100 км², а также овраги и суходолы [14].

В последнее время на Севере все шире применяют стальные трубы, собираемые на месте строительства из отдельных сегментов [15]. Это позволяет использовать краны малой грузоподъемности и вертолеты, что особенно важно при выполнении работ в труднодоступных и сложных условиях строительства. Однако такая технология отличается повышенной трудоемкостью и недостаточной надежностью образуемых швов между сегментами, что снижает ее эффективность.

В целях повышения эффективности строительства водопропускных сооружений (в частности, на малых реках в сложных природно-климатических условиях) в ТвГТУ было предложено новое техническое решение, а именно многоочковое водопропускное сооружение в виде многоканальной спиральной трубы, а также технология ее возведения [16].

Техническая идея строительства быстровозводимого бетонного водопропускного сооружения реализуется путем формирования на грунтовом основании арматурного спирального каркаса из полимерной геосетки с водопропускными каналами из композитных трубок по всему сечению трубы, после чего устанавливается опалубка и в нее подается бетонная смесь. При этом в бетонную смесь предлагается включать новые дисперсно-армирующие композитные волокна повышенного сцепления: микросетки или многоанкерную фибру, которые, как показали предварительные испытания, повышают прочность бетона на сжатие и изгиб на 25–30 %. Прочность водонасыщенных фибробетонных образцов в этом случае не снижается [17]. Такое техническое решение позволяет значительно ускорить процесс строительства водопропускных сооружений в сложных природно-климатических условиях и сократить затраты.

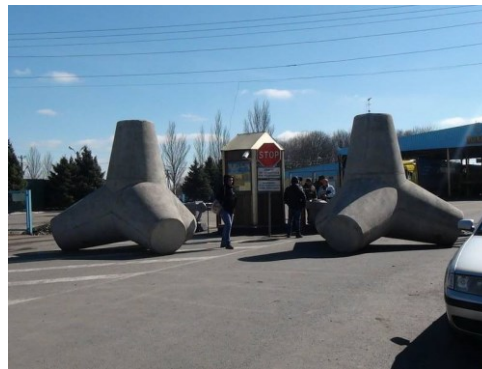
ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА В ОБОРОННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В случае применения тяжелого бетона в оборонном строительстве необходимо учитывать, кроме суровых условий строительства на Севере, также воздействие возможных ударных нагрузок на специальные бетонные и железобетонные конструкции (например, специзделия для заграждений: «ежи», «зубы дракона», бункеры и др.).

В этой связи обратимся к опыту других регионов России. Так, власти Белгородской области устанавливают (с учетом продолжающейся специальной военной операции на Украине) защитные сооружения. В частности, в открытом поле в направлении возможного удара противника в два ряда были расставлены бетонные блоки пирамидальной формы в виде «ежей» (рис. 5). Как правило, их используют в качестве противотанковых заграждений [18].



а



б

Рис. 5. Защитное сооружение в виде пирамидальных блоков:
а – в полевых условиях [19]; б – в городской среде [20]

Поскольку тяжелый бетон отличается повышенной хрупкостью при воздействии ударных нагрузок или боеприпасов, сопровождаемом разлетом осколков, предлагается применять модифицированный тяжелый бетон с усиленной структурой и демпферным эффектом (например, с использованием химических добавок в комплексе с дисперсным армированием). Инженеры Военного учебного центра Дальневосточного федерального университета разработали способ получения новых цементных ремонтных и самоуплотняющихся составов с использованием отходов производства, пригодных для применения на различных объектах Министерства обороны Российской Федерации. При разработке таких композиций были использованы компоненты только российского производства [21]. В частности, был разработан состав ударопрочного бетона, в котором 40 % цемента заменили отходами производства: золой рисовой шелухи, отсевом дробления известняка и кварцевого песка. Устойчивость к трещинам нового бетона в 6–9 раз превосходит аналогичную устойчивость традиционных образцов, изготовленных согласно ГОСТу. Разработку предлагают использовать для защитных сооружений военного и гражданского назначения, несущих конструкций атомных станций в Арктике.

Особенность нового бетона состоит в том, что его прочность возрастает вместе с увеличением воздействующей на него ударной силы. При ударе в бетонной плите возникает «эффект резины»: она сжимается и частично пружинит, не растрескиваясь. Разработчики считают, что конструкция обладает «динамической вязкостью», поглощает удар. Такого эффекта удалось добиться за счет армирования бетона добавками волокон металла или приморского базальта.

Кроме ударных нагрузок, бетон может быть подвержен и огневому воздействию. Например, для повышения безопасности авиационной и другой специальной техники используют защитные бетонные укрытия арочного типа. При термическом воздействии бетон и арматура подвержены достаточно быстрому нагреву до критической температуры, что приводит к снижению несущей способности и устойчивости железобетонных конструкций.

В настоящее время для повышения огнестойкости с сохранением нормативной прочности железобетонных конструкций все шире применяют технологию многослойных изделий, т.е. используют строительные изделия и конструкции вариативной структуры, в

которых имеется несущий высокопрочный бетонный слой и защитный (огнестойкий) с применением термостойкого бетона [22]. Задачи повышения показателей прочности и снижения трещиностойкости несущего слоя бетона решались за счет его микроармирования волокнами хризотил-асбеста, а задачи повышения огнестойкости – за счет внесения минерала шунгита в защитный слой поризованного бетона.

Важным вопросом безопасности является предотвращение или сокращение объема осколков при ударно-огневом воздействии на защитные бетонные сооружения. В работе [23] показано, что характер разрушения высокопрочного бетона при воздействии открытого огня отличается от механизма деструкции обычного тяжелого бетона. Различие выражено главным образом взрывообразной потерей целостности конструкций из высокопрочного бетона при резком нагреве во время пожара. Предлагаются способы снижения вероятности протекания взрывообразного разрушения бетона, одним из которых является введение в состав бетона выгорающей полимерной фибры, а также стальной фибры.

Полимерное волокно повышает устойчивость высокопрочных бетонов к взрывообразному разрушению в основном за счет образования в бетоне каналов трубчатой структуры после плавления полипропиленового волокна при температуре 160 °С. Возникновение разветвленной системы таких каналов в структуре бетона способствует снижению внутреннего давления пара, образующегося при испарении физически и адсорбционно связанной воды из цементного камня.

В заключение можно сказать, что выполненный анализ известных работ, посвященных свойствам тяжелого бетона и его использованию в транспортном строительстве и оборонной отрасли, применительно к арктическим зонам показал, что тяжелый бетон является одним из наиболее широко используемых строительных конструкционных материалов. Кроме того, выявлено, что в настоящее время особенно востребованы модифицированные и дисперсно-армированные тяжелые бетоны – бетоны с улучшенными физико-механическими свойствами для использования в сложных природно-климатических и грунтовых условиях строительства на Севере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокина Н.Ю. Приморские регионы арктического направления: проблемы и перспективы социально-экономического развития в Российской Федерации. *Стратегические перспективы развития Арктического региона: Материалы Научно-практической конференции Совета по изучению производительных сил ВАВТ Минэкономразвития России / под ред. С.А. Липиной*. М.: ВАВТ, 2018. С. 45–49.
2. Луцкий С.Я., Шепитько Т.В., Токарев П.М., Дудников А.Н. Строительство путей сообщения на Севере. М.: ЛАТМЭС, 2009. 286 с.
3. Арктический мониторинг: законодатели предлагают изменить подходы к проектированию и строительству в зоне многолетней мерзлоты. URL: <https://stroygaz.ru/publication/regulation/> (дата обращения: 12.09.2025).
4. Воронцова С.Д. Влияние климатических изменений на транспортную инфраструктуру в Арктической зоне и на территориях распространения // *Транспорт Российской Федерации*. 2017. № 4 (71). С. 33–39.
5. Шудяков К.В. Тяжелые бетоны, стойкие к циклическим воздействиям в суровых условиях эксплуатации: дисс... канд. техн. наук. Пенза, 2021. 178 с.

6. Алексеев А.Г. Геотехнический мониторинг на многолетнемерзлых грунтах: учебное пособие. М.: АСВ, 2019. 112 с.
7. Зброшенная РЛС в Арктике. URL: <https://avatars.dzeninfra.ru/getzen> (дата обращения: 12.09.2025).
8. Лесовик Р.В., Агеева М.С., Ключев С.В., Лесовик Г.А., Сопин Д.М. Разработка методологии проектирования мелкозернистых фибро-текстиль бетонов на техногенных песках Белгородской области. *Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и правительством Белгородской области: Материалы научно-технической конференции*. Белгород: БГТУ им. В.В. Шухова, 2015. С. 227–241.
9. Трофимов В.И., Джабаров А.С. Улучшение структурно-механических свойств бетона включением высокомодульных и низкомодульных волокон. *Теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов: сборник научных трудов: в 2 ч. / под ред. С.В. Рассадина*. Тверь: ТвГТУ, 2020. Ч. 1. С. 19–25.
10. Патент РФ 2725054С1. *Способ приготовления фибробетонной смеси* / Трофимов В.И., Леушкин В.Ю., Джабаров А.С. Заявл. 30.08.2019. Оpubл. 29.06.2020, Бюл. № 19.
11. Трофимов В.И. Дорожные и аэродромные плиты с улучшенными эксплуатационными свойствами для Арктической зоны // *Научный Вестник Арктики*. 2023. № 14. С. 5–10.
12. Синявский А.С., Трофимов В.И. К вопросу повышения долговечности работы цементобетонных дорог в арктических зонах. *Строительство и землеустройство: проблемы и перспективы развития: Материалы Всероссийской научно-практической конференции / под ред. А.А. Артемьева, В.В. Белова, Т.Р. Баркая*. Тверь: ТвГТУ, 2019. С. 126–131.
13. Трофимов В.И., Егоров А.Р., Хитрич Г.А. Сборные дорожные плиты для арктических зон // *Научный Вестник Арктики*. 2022. № 12. С. 51–56.
14. Лукин Н.П., Лукин А.Н., Щуко С.А. Автомобильные дороги. Трубы под насыпями автомобильных дорог // *ЦБНТИ. Обзорная информация*. Вып. 6. М.: ЦБНТИ, 1988. 30 с.
15. СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*. М.: ОАО «ЦПП», 2011. 287 с.
16. Патент РФ 2619604С1. *Конструкция для формирования на месте строительства сечения для пропуска воды* / Трофимов В.И., Кондратьев В.Г., Пупенин К.И., Акушко А.С. Заявл. 11.02.2016. Оpubл. 17.05.2017, Бюл. № 14.
17. Трофимов В.И. Многоканальная спиральная труба – новое слово в технологии строительства водопропускных сооружений. *Достижения и перспективы развития вузовской науки: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции*. Чебоксары: ЧКИ РУК, 2018. С. 429–434.
18. Оборонительные заграждения: как и от кого всерьез: URL: <https://topwar.ru/203920-oboronitelnye-zagrazhdenija-kak-i-ot-kogo-vserez.html> (дата обращения: 12.09.2025).
19. В Белгородской области устанавливают противотанковые заграждения. URL: https://m.vk.com/wall-62786482_794431 (дата обращения: 12.09.2025).
20. Barreras Defensivas: Cómo y de Quién Seriamente. URL: es.topwar.ru (дата обращения: 12.09.2025).
21. Бирюков А.Н., Дудурич Б.Б., Бирюков Ю.А. Новые быстротвердеющие цементные составы для проведения текущего, капитального ремонтов и ликвидации чрезвычайных ситуаций на объектах Министерства обороны Российской Федерации // *Военный инженер*. 2018. № 1 (7). С. 37–45.

22. Леденев А.А., Внуков А.Н., Загоруйко Т.В., Перцев В.Т. Исследование и разработка термостойких бетонов для повышения огнестойкости строительных конструкций зданий и сооружений военного назначения // *Воздушно-космические силы. Теория и практика*. 2018. № 6. С. 198–204.
23. Ахтямов Р.Я., Ахмедьянов Р.М., Гамалий Е.А., Аверина Г.Ф. К вопросу обеспечения стойкости изделий и конструкций из высокопрочных бетонов к взрывообразному разрушению // *Строительные материалы*. 2024. № 1-2. С. 90–94.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ТРОФИМОВ Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vitrofa@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Трофимов В.И. К вопросу применения тяжелого бетона с учетом изменяющихся условий строительства в Арктической зоне // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 3 (27). С. 25–35.

ON THE ISSUE OF THE USE OF HEAVY CONCRETE IN THE ARCTIC ZONE, TAKING INTO ACCOUNT CHANGING CONSTRUCTION CONDITIONS

V.I. Trofimov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. This article discusses the urgent problem of increasing the efficiency of heavy concrete use in transport and defense construction in the North. The classification of the areas of application of heavy concrete is given, taking into account its work in difficult climatic and soil conditions of construction in the North. It is shown that in order to increase the efficiency of concrete products and structures, it is necessary to use modified and dispersed reinforced concrete, as well as multilayer concrete products and structures with extensive use of composite materials.

Keywords: heavy concrete, physical and mechanical properties, transport and defense construction, reinforcement, and modification.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

TROFIMOV Valery Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vitrofa@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Trofimov V.I. On the issue of the use of heavy concrete in the Arctic zone, taking into account changing construction conditions // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2025. No. 3 (27), pp. 25–35.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.31 + 621.311.1

**АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГРАФИКА НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ
С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ РАЗМЕРА ОПЛАТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ****С.В. Маринова***Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Маринова С.В., 2025

Аннотация. В статье отмечено, что смещение части электропотребления промышленного предприятия с часов максимальной и пиковой нагрузки на другие временные диапазоны может давать экономическую выгоду за счет выравнивания графика нагрузки. Подчеркнуто, что перераспределение энергопотребления с целью выравнивания графика не только снижает расходы промышленных предприятий на производство, но и дает возможность субъектам электроэнергетики оптимизировать генерацию и транспортировку энергоресурсов.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, прогнозирование, моделирование потребления, потребление электроэнергии, график нагрузки.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-36-47**ВВЕДЕНИЕ**

Одним из направлений развития производства является внедрение технологий энергосбережения и повышения энергетической эффективности, к которым относится прогнозирование электропотребления. Прогнозирование – это основа планирования и контроля, а попытки рассчитать будущие тенденции необходимы для функционирования электроэнергетики. Растущие финансовые расходы промышленных предприятий на электроэнергию определяют высокую актуальность планирования режима электропотребления, изменения режимов работы электротехнических установок и разработки технологических методик, способствующих снижению расходов на электроэнергию.

Прогнозирование электропотребления промышленного предприятия является традиционным способом сокращения расходов на энергоносители. При этом производителям электроэнергии и сетевым компаниям, выступающим субъектами электроэнергетики, точный прогноз электропотребления дает ряд выгод: возможность оптимизировать производство энергоресурсов, транспортировку и резервирование электроэнергии, планировать профилактические и ремонтные работы, за счет чего в конечном итоге повышается безопасность работы всей энергосистемы. Современный рынок электроэнергии – это «рынок продавца», который посредством ценовой политики

диктует потребителям тенденцию на изменение режима работы для выравнивания графика нагрузки (ГН) всей системы «производитель – транспортировщик – потребитель».

СТРУКТУРА ЗАТРАТ НА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ

Тверская область – крупнейший субъект европейской части России, на территории которого передачу и распределение электрической энергии обеспечивает филиал ПАО «Россети Центр» – «Тверьэнерго» [1]. Около четверти потребителей сетевой инфраструктуры на территории Тверской области – это промышленные предприятия, присоединенные к сетям по среднему уровню напряжения 6, 10 кВ с оплатой электроэнергии по четвертой ценовой категории (4 ЦК).

Предельный уровень нерегулируемых цен для 4 ЦК гарантирующий поставщик (ГП) рассчитывает в соответствии с Постановлением Правительства РФ № 442 от 4 мая 2012 года [2]. В структуру цены входят следующие составляющие:

1. Дифференцированная по часам расчетного периода нерегулируемая цена на электрическую энергию на оптовом рынке, определяемая по результатам конкурентных отборов на сутки вперед и для балансирования системы.
2. Средневзвешенная нерегулируемая цена на мощность на оптовом рынке.
3. Ставка для целей определения расходов на оплату нормативных технологических потерь электрической энергии в электрических сетях тарифа на услуги по передаче электрической энергии.
4. Ставка, отражающая удельную величину расходов на содержание электрических сетей, тарифа на услуги по передаче электрической энергии.
5. Сбытовая надбавка гарантирующего поставщика.
6. Плата за услуги по управлению изменением режима потребления электрической энергии.
7. Плата за иные услуги, оказание которых является неотъемлемой частью процесса поставки электрической энергии потребителям.

Упрощенно затраты на электропотребление по 4 ЦК зависят от трех составляющих, среди которых расходы на электроэнергию, генерацию (производство) мощности и передачу (транспортировку) мощности (рис. 1).

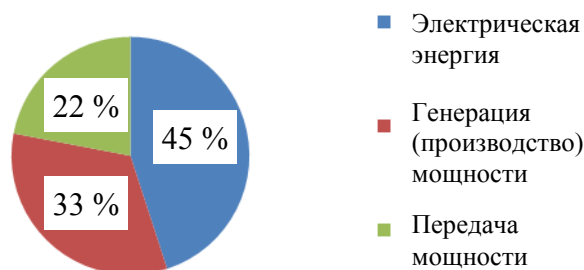


Рис. 1. Структура затрат на электропотребление для промышленных предприятий [3]

Зависимость выразим формулой

$$C = C_{\text{эз}} + P_{\text{max}} \cdot C_{\text{max}} + P_{\text{сети}} \cdot C_{\text{сети}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{эз}}$ – стоимость составляющей платы за электроэнергию, руб., включающая дифференцированные по часам расчетного периода нерегулируемые цены на

электрическую энергию на оптовом рынке, определяемые по результатам конкурентных отборов на сутки вперед и для балансирования системы; P_{max} – величина мощности, МВт, соответствующая покупке ГП у производителей электрической энергии (мощности) на розничном рынке; Π_{max} – средневзвешенная нерегулируемая цена за мощность на оптовом рынке, руб.; $P_{сету}$ – передаваемая мощность (транспортировка мощности) в расходах на содержание электрических сетей и услугах по передаче электрической энергии, МВт; $\Pi_{сету}$ – дифференцированная по уровням напряжения ставка тарифа на услуги по передаче электрической энергии за содержание электрических сетей, руб/МВт.

Стоимость составляющей платы за электроэнергию $C_{э}$ определяется по формуле

$$C_{э} = \sum_k^d \sum_j^{24} C_{cmkj} \cdot \Pi_{час.kj}, \quad (2)$$

где C_{cmkj} – ставка предельного уровня нерегулируемых цен за электроэнергию, руб/МВт·ч, для каждого j -го часа k -х суток (для 4 ЦК потребителя, конкретного диапазона максимальной присоединенной мощности оборудования потребителя); $\Pi_{час.kj}$ – потребление электроэнергии, МВт·ч (мощность, МВт), за конкретный час в сутках расчетного месяца; d – количество дней в расчетном месяце.

Величина мощности P_{max} , соответствующая покупке ГП у производителей электрической энергии (мощности) на розничном рынке, определяется как среднее арифметическое значение фактических почасовых объемов покупки электрической энергии ГП у таких производителей в указанные в п. 95 Постановления Правительства РФ [2] часы расчета величины на розничном рынке, которые публикуются коммерческим оператором оптового рынка (АО «АТС» [11]) в соответствии с правилами оптового рынка. Величина мощности устанавливается по формуле

$$P_{max} = \sum_{i=1}^n P_{ATC} / d_{раб}, \quad (3)$$

где i – рабочий день (будни) расчетного месяца; P_{ATC} – значение мощности в конкретный час максимальной нагрузки, определенный АО «АТС» для ГП, МВт; $d_{раб}$ – количество рабочих дней (будней) в расчетном месяце.

Передаваемая мощность (транспорт мощности) в каждый рабочий день расчетного месяца определяется в часы пиковой нагрузки, утвержденные Системным оператором Единой энергетической системы (АО «СО ЕЭС») [3]. Для расчетов выбирается максимальная мощность, МВт, из диапазона установленных часов каждого рабочего дня расчетного месяца, суммируется, а полученное значение делится на количество рабочих дней:

$$P_{сету} = \sum_{i=1}^n P_{CO} / d_{раб}, \quad (4)$$

где $P_{сету}$ – оплачиваемое значение мощности, передаваемой сетями, МВт; i – рабочий день (будни) расчетного месяца; $d_{раб}$ – количество рабочих дней в месяце.

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ГРАФИКА НАГРУЗКИ

Построение расчетной модели ГН заключается в выявлении взаимосвязей между различными показателями: динамикой изменения цен розничного рынка, техническим, организационным процессом производства и работой соответствующего оборудования, влиянием внешних факторов (рабочие дни/выходные, сезонность, ремонт и т.д.).

Рассмотрим алгоритм анализа данных, в том числе цен рынка электроэнергии, для планирования электропотребления расположенного на территории Тверской области кирпичного завода, имеющего присоединенную мощность 2 500 кВА, в целях сокращения размера оплаты электропотребления за июнь 2025 года. Потребитель рассчитывается по 4 ЦК, ГН предприятия отмечается высокой суточной волатильностью (неравномерностью почасового потребления в течение суток).

Предлагается следующий алгоритм для прогнозирования ГН:

1. Анализ особенностей затрат на электропотребление и их составляющих с использованием данных такого же месяца, для которого проводится прогнозирование, за несколько прошлых лет (в данной работе – за 4 прошедших года), а также составляющих стоимости электропотребления.

1.1. Расходы на электроэнергию. Составляющая $C_{э}$.

При анализе дифференцированной по часам расчетного периода нерегулируемой цены на электрическую энергию на оптовом рынке, определяемой по результатам конкурентных отборов на сутки вперед и для балансирования системы и обозначенной как $C_{э}$, выявим диапазон часов с максимальными C_{max} и минимальными C_{min} ценами.

Вероятные минимальные цены почасового потребления прогнозируемого месяца приходятся на диапазон с 4-го по 5-й часы в сутках; вероятные максимальные цены составляющей $C_{э}$ для рассматриваемого месяца – с 9-го по 23-й часы включительно в сутках с наибольшей частотой, выпадающей на интервал с 15 до 17 часов.

1.2. Генерация (производство) мощности. Составляющая P_{max} .

В затратах на мощность, покупаемую на оптовом рынке, учитываются средневзвешенная нерегулируемая цена на мощность на оптовом рынке C_{max} и величина покупаемой мощности P_{max} . Величина мощности P_{max} участвует в расчетах в определенные часы максимума нагрузки, которые не известны заранее, а публикуются администратором торговой системы (АО «АТС») для ГП только по прошествии расчетного периода. При учете данной составляющей в прогнозной модели предлагается использовать вероятность выпадения того или иного часа для дальнейшего расчета максимальной нагрузки (таблица) по результатам обработки статистики такого же месяца, как и прогнозируемый, но за прошлые годы.

Вероятность выпадения часов максимальной нагрузки
для гарантирующего поставщика на прогнозируемый месяц

Час в сутках	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Вероятность, %	37,6	32,1	21,5	0	0	2,4	3,9	0	0	0	0	2,5

Данные таблицы показывают, что период максимума мощности P_{max} для прогнозируемого месяца, очевидно, будет выпадать на 10, 11, 12-й часы в сутках, следовательно, при планировании потребления предприятия необходимо минимизировать работу электрооборудования в этом периоде. Кроме того, из таблицы видно, что период максимальной нагрузки для прогнозируемого месяца никогда не выпадает на 13, 14, 17, 18, 19, 20-й часы, поэтому такой период можно рассматривать в качестве потенциала для увеличения нагрузки электрооборудования.

1.3. Передача (транспортировка) мощности. Составляющая $P_{сети}$.

Составляющая стоимости услуг по передаче электроэнергии отражает операционные и инвестиционные затраты электросетевой инфраструктуры на обеспечение бесперебойного и надежного энергоснабжения потребителя.

Затраты сетевой инфраструктуры на транспортировку мощности предусматривают плату за содержание электрических сетей, тариф на услуги по передаче электрической энергии $C_{сети}$, учет максимальной мощности $P_{сети}$ по рабочим дням месяца. При этом данные о периодах плановых часов пиковой нагрузки АО «СО ЕЭС» известны заранее, перед началом календарного года, что является преимуществом и используется в прогнозной модели.

Так, для прогнозируемого месяца (июнь 2025 года) у территорий, к которым относится Тверская область (исходя из пятидневной рабочей недели), плановые часы пиковой нагрузки определены АО «СО ЕЭС» в диапазонах с 8-го по 16-й часы и с 20-го по 21-й часы.

Плановые часы пиковой нагрузки, утвержденные на прогнозируемый месяц АО «СО ЕЭС», включают часы рабочего времени производства, которые отсутствуют в установленных АО «АТС» часах максимальной нагрузки и не учитываются в расчетах по оплате передачи (транспортировки) мощности.

Таким образом, работа электрооборудования в оставшиеся диапазоны – ночной (с 22 до 7 часов) и дневной (с 17 до 19 часов) – не будет способствовать увеличению составляющей затрат $P_{сети}$ в электропотреблении.

Совместим на графике рабочих суток прогнозируемого месяца (рис. 2) следующие диапазоны, рассмотренные в п. 1.1–1.3:

вероятные часы максимальных почасовых цен за электроэнергию C_{max} (синий цвет);
 часы вероятного максимума нагрузки P_{max} АО «АТС» (красный);
 часы пиковой нагрузки, утвержденные АО «СО ЕЭС» (зеленый).

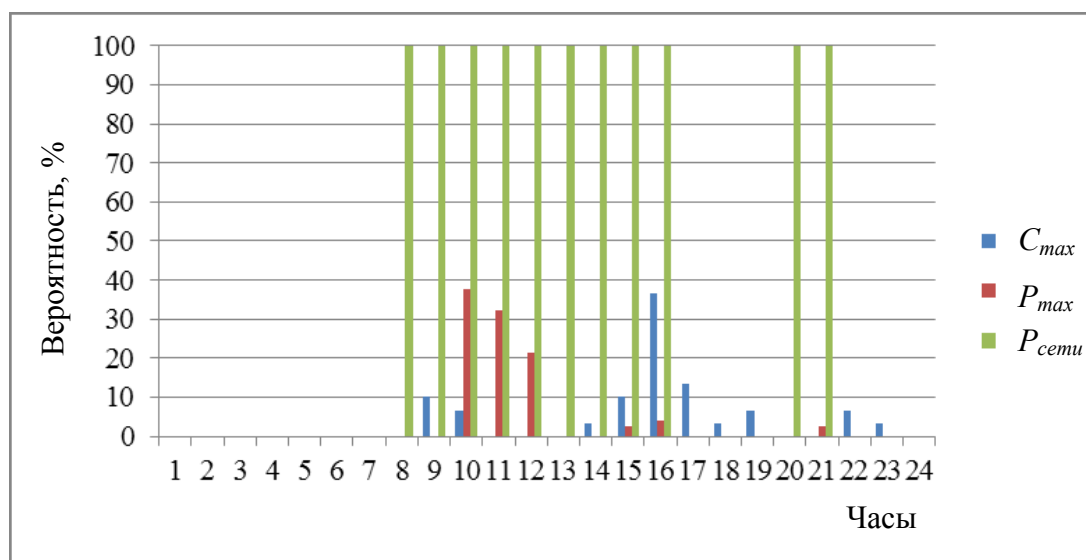


Рис. 2. Сутки в прогнозируемом месяце с наложением плановых часов пиковой нагрузки, вероятных часов максимальной цены за электроэнергию и вероятных часов максимальной нагрузки

2. Построение типового графика электрической нагрузки предприятия с выделением статистических групп (СГ).

2.1. Построение типового ГН.

Для планирования почасового электропотребления необходимо построить типовой суточный график нагрузки (СГН) предприятия с использованием фактических данных автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) за прошедшие периоды. На этом этапе выявляются периодические колебания электропотребления в зависимости от суточных (работа, отключение оборудования), недельных (рабочий день, выходной), сезонных изменений, климатических и других факторов.

Спрос на электропотребление рассматриваемого предприятия-потребителя характеризуется высокой внутрисуточной волатильностью, поэтому СГН должен быть разделен на несколько зон.

В типовом СГН предприятия, отражающем суточные стадии производства, выделяем три зоны [5]:

минимальной нагрузки (ночные часы, или ночной провал) с мощностью не больше значения $P_{ноч}$;

средней, или полупиковой, нагрузки с мощностью $P_{пн}$,

максимальной, или пиковой, нагрузки $P_{пик}$.

Потребление в каждый час дня СГН прогнозируется как среднее арифметическое за аналогичные выбранные дни в тот же час фактического ГН предприятия по данным АИИС КУЭ:

$$P_{xt} = \sum_{d=1}^n P_{td} / n, \quad (5)$$

где P_{xt} – значение типового электропотребления (мощности) в час t ; P_{td} – потребление электроэнергии (мощность) в час t в день d ; t – порядковый номер часа в день d по данным АИИС КУЭ.

Типовые ГН предприятия можно получать другими методами, описанными, например, в источнике [5].

2.2. Выделение СГ.

В ГН предприятия необходимо выделить СГ, используя следующую систему аналитических характеристик [5]:

1) коэффициент неравномерности (волатильности):

$$\alpha = P_{ноч} / P_{пик}. \quad (6)$$

Коэффициент неравномерности (волатильности) может принимать значения от 0 до 1. Приближение значения этого показателя к 0 свидетельствует о высокой волатильности ГН потребителя (и наоборот) [6];

2) коэффициент заполнения:

$$\beta = P_{ср} / P_{пик}. \quad (7)$$

Коэффициент может меняться в диапазоне от 0 до 1. Чем выше показатель приближается к значению 1, тем меньше волатильность спроса потребителя в рамках суточного интервала.

Данные показатели у рассматриваемого потребителя: $\alpha = 0,3$; $\beta = 0,6$;

3) полупиковый диапазон регулирования нагрузки:

$$\Delta P_{пн} = P_{пн} - P_{ноч}; \quad (8)$$

4) пиковый диапазон регулирования нагрузки:

$$\Delta P_n = P_{\text{пик}} - P_{\text{нп}}. \quad (9)$$

Если выходные дни или сутки с нехарактерной нагрузкой будут иметь рассмотренные выше аналитические характеристики СГ, сильно отличающиеся от таких же показателей рабочих дней, то необходимо выделить СГ для выходных дней и нехарактерных суток.

Аналитические характеристики ГН выходных дней у рассматриваемого завода аналогичны показателям будней, дни простоев (ремонта) не планируются, поэтому достаточно трех сформированных СГ.

Типовой график электрической нагрузки предприятия с выделением СГ для рассматриваемого кирпичного производства с односменным графиком работы состоит из следующих СГ: пиковой статистической группы СГп, полупиковой статистической группы СГпп, ночной (базовой) СГноч. Типовой ГН с указанием СГп (верхняя часть), полупиковой статистической группы СГпп (средняя часть), ночной (базовой) СГноч (нижняя часть) представлен на рис. 3.

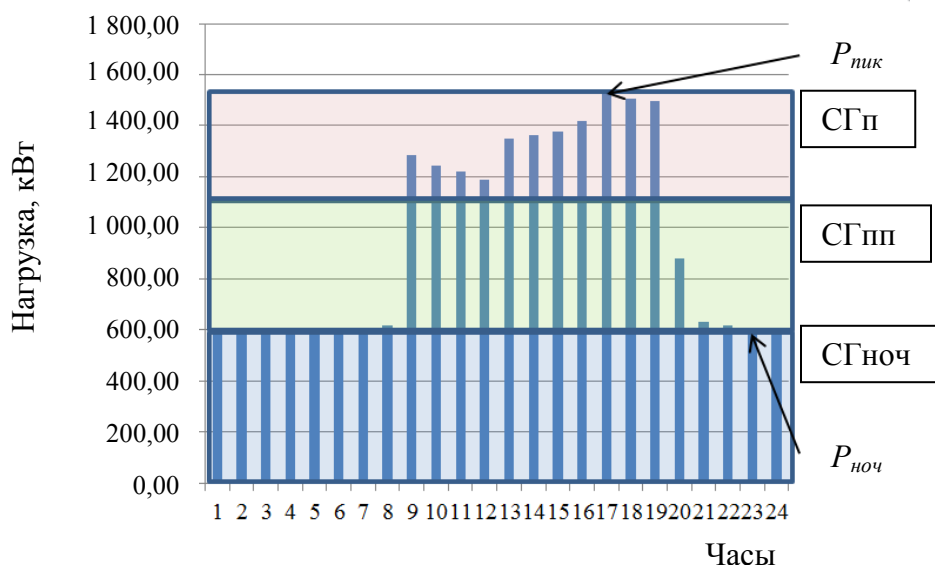


Рис. 3. Типовой график электрической нагрузки предприятия с выделением СГ для кирпичного производства с односменным графиком работы

Следует отметить, что получение типового графика электрической нагрузки может проводиться другими методами построения графика базовой нагрузки, описанными в источнике [6], а группировка по зонам – с применением, например, кластерного анализа [8].

3. Выделение в структуре электропотребления предприятия нагрузки основного производства, вспомогательного оборудования. Рассмотрение возможности переноса работы вспомогательного оборудования либо его части (отдельных агрегатов) за счет уменьшения нагрузки, приходящейся на следующие диапазоны в сутках, в которых:

- утверждены плановые часы пиковой нагрузки АО «СО ЕЭС»;
- отмечается вероятность назначения АО «АТС» часов максимума нагрузки для ГП;
- возможны максимальные почасовые цены электроэнергии;

нет учета составляющей производства или передачи мощности (см. п. 1.2, 1.3) для использования в расчетах либо отсутствует такая вероятность учета составляющей мощности.

Смещение нагрузки электропотребления или ее части хотя бы из одного диапазона, обозначенного цветом на рис. 2, принесет выгоду в отношении затрат на электропотребление. Наибольший экономический эффект следует ожидать от комплексного смещения ГН из периодов, отмеченных двумя и (особенно) всеми тремя составляющими. При этом происходит перераспределение объемов электропотребления на то время, когда это экономически выгодно. К таким периодам относятся 10, 15, 16-й часы (см. рис. 2). Предприятие должно быть готово к подобному основательному пересмотру своего технологического режима.

ПРИМЕР МОДЕЛИРОВАНИЯ ГРАФИКА НАГРУЗКИ

В качестве примера покажем ГН рассматриваемого потребителя без смещения нагрузки и со смещением нагрузки вспомогательного оборудования в размере 10 % с диапазона, включающего 10, 11, 12-й часы, на диапазон, включающий 17, 18, 19-й часы, без изменения общего электропотребления и без вреда технологическим процессам. Диапазон с 17 до 19 часов имеет несколько потенциальных для экономической выгоды качеств: во-первых, это дневное время, поэтому не требуется смещать работу персонала на ночь; во-вторых, в этом периоде отсутствует учет транспортируемой сетями мощности (составляющая $P_{сети}$); в-третьих, нет вероятности попадания часов максимальной нагрузки, назначаемой АО «АТС» по прошествии расчетного месяца.

Часть переносимой нагрузки обозначим другим цветом (рис. 4).

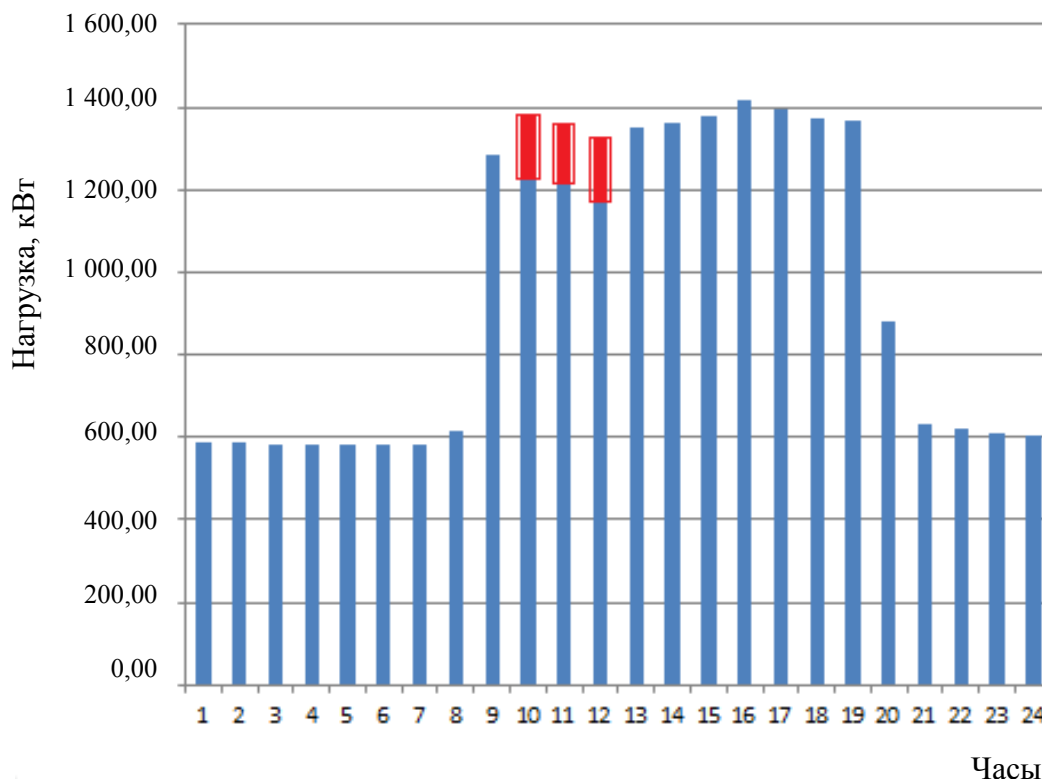


Рис. 4. Типовой ГН предприятия

После смещения части нагрузки на указанный диапазон получили новый график (рис. 5). Для определения полученной выгоды провели расчет стоимости затрат на электропотребление с новым ГН за месяц и сравнили стоимость затрат за тот же расчетный период с первоначальным графиком, т.е. без смещения части нагрузки. Предлагаемый перенос осуществлен в пределах работы всей рабочей смены, которая остается в диапазоне с 9 до 20 часов, рабочий график персонала существенно не сдвинулся, при этом пересмотрен технологический график включения вспомогательного оборудования. Так, для кирпичного производства, например, можно перераспределить работу части технологического оборудования (дробилок, мельниц, установок транспортировки, упаковочного оборудования).

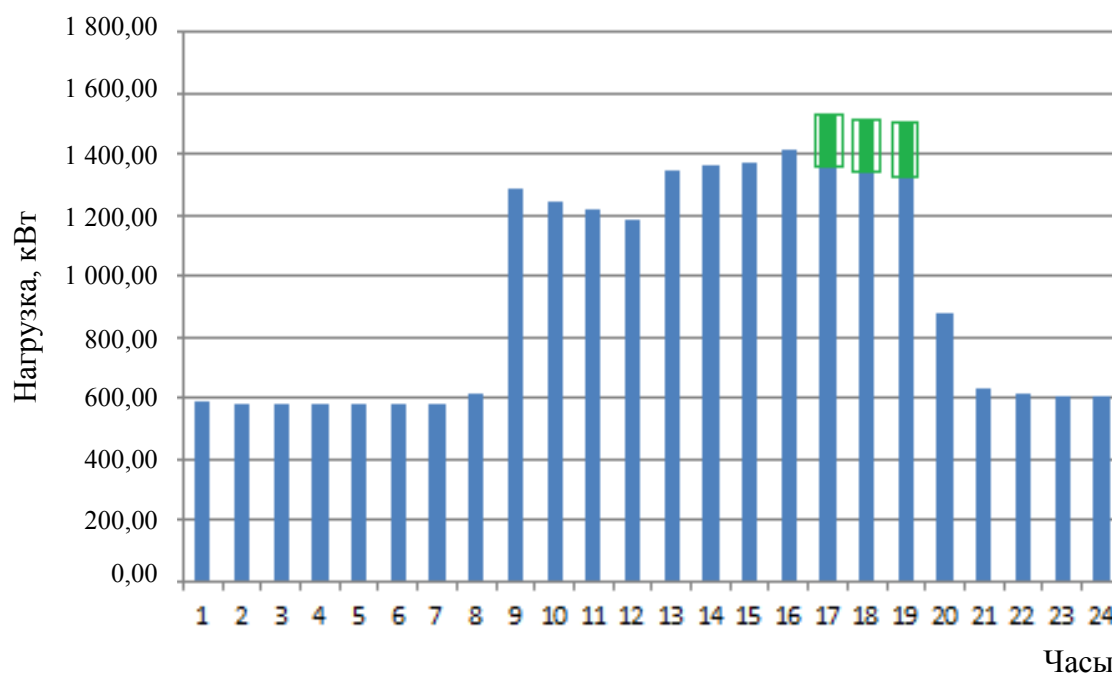


Рис. 5. Типовой ГН предприятия
с переносом части работы производственных мощностей

В ходе сравнения затрат установлено, что предлагаемый перенос части нагрузки за рассмотренный месяц дает 2 % экономии при оплате электропотребления промышленного предприятия. В пересчете на год это позволит получить выгоду в сумме порядка 700 000 рублей. Очевидно, что при планировании графиков электропотребления промышленного потребителя, осуществляющего расчеты по 4 ЦК, в другие месяцы выгода может быть то больше, то меньше в зависимости, например, от разброса стоимости часового потребления C_{cmkj} в каждом месяце, от необходимости формирования дополнительных СГ и от множества других причин.

В целях сокращения размера платы за электропотребление алгоритм моделирования плановой нагрузки должен комплексно решать задачи:

анализа стоимости составляющих затрат на электропотребление;
вероятности и распределения временных диапазонов максимальных и минимальных дифференцированных по часам расчетного периода нерегулируемых цен на электрическую энергию на оптовом рынке, определяемых по результатам конкурентного отбора ценовых заявок на сутки вперед;

оценки вероятности попадания часов максимума нагрузки, определяемой АО «АТС» для конкретного ГП предприятия-потребителя, на основе математической статистики;

учета интервалов пиковой нагрузки, устанавливаемых АО «СО ЕЭС»;
составления технологических карт работы оборудования на каждый месяц для отдельных производственных участков.

Перенос фактических максимумов нагрузки потребителя из временной зоны, где учитывается мощность, в любом случае является эффективным в связи с дороговизной стоимости генерации и транспортировки мощности в этих временных диапазонах по сравнению со стоимостью электроэнергии.

Избегание вероятных часов с высокой ставкой за электроэнергию, вероятных часов максимума нагрузки в рабочие дни, использование интервала в периоды, не учитываемые в плановой пиковой нагрузке АО «СО ЕЭС», – это характерная особенность предлагаемой модели, способной снижать затраты одновременно по трем составляющим.

Из анализа составляющих затрат на электроэнергию, а также из рис. 2 следует, что наибольшую выгоду мог бы дать перенос нагрузки на 4, 5-й часы в сутках, как это предложено в статье [8]. В данном периоде стоимость почасовой ставки электроэнергии наименьшая, а ночью в расчетах не учитывается как P_{max} со стороны производителей электроэнергии, так и $P_{сети}$ со стороны сетевых организаций. Эта рекомендация дана автором статьи [8], но таким потенциалом обладают далеко не все предприятия, в том числе и рассматриваемый в данной работе потребитель. В ночные часы работают предприятия-потребители, и так имеющие возможность применения подобного графика. Среди них хлебопекарные комбинаты, производящие продукцию ночью, чтобы утром поставить ее в торговую сеть, а также строительные карьеры, где добыча щебня и песка ведется энергоемкими земснарядами исключительно в ночное время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм моделирования ГН имеет ряд достоинств:
простоту, которая позволяет потребителю самостоятельно определить степень ожидаемого эффекта при перераспределении заданной части электропотребления;
возможность моделирования ГН в доступной среде электронных таблиц на основе имеющихся данных совместно с АИИС КУЭ предприятия, что облегчает внедрение такой модели на практике;
возможность экономии средств предприятием-потребителем при оплате электропотребления, причем без изменения общего электропотребления и без вреда технологическим процессам и бизнесу;
способность адаптации к другим промышленным предприятиям;
возможность использования в программах управления спросом на электропотребление (Demand Response), т.е. в инициативной форме экономического взаимодействия субъектов электроэнергетики с конечными потребителями электрической

энергии, обеспечивающей взаимовыгодное, экономически эффективное регулирование объемов и режимов электропотребления [8].

Алгоритм моделирования ГН активизирует внутренние резервы для повышения эффективности электропотребления не только на уровне потребителя, но и на уровне энергосистемы в целом за счет снижения выработки электростанциями энергии, имеющей наиболее высокую себестоимость [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиал ПАО «Россети Центр» – «Тверьэнерго». URL: <https://www.mrsk-1.ru/about/branches/tverenergo/about/> (дата обращения: 01.07.2025).
2. О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии (вместе с «Основными положениями функционирования розничных рынков электрической энергии», «Правилами полного и (или) частичного ограничения режима потребления электрической энергии»): постановление Правительства РФ от 04.05.2012 № 442 (ред. от 01.11.2024) // *Собрание законодательства РФ*. 2012. № 23. Ст. 3008.
3. АО «СО ЕЭС». URL: <https://www.so-ups.ru/> (дата обращения: 01.07.2025).
4. Соловьева И.А., Дзюба А.П. Управление затратами на электропотребление промышленных предприятий на базе модели оптимизации графиков электрических нагрузок // *Известия Тульского государственного университета. Экономические и юридические науки*. 2017. № 1-1. С. 165–174.
5. Гуртовцев А.Л., Забелло Е.П. Электрическая нагрузка энергосистемы. Выравнивание графика // *Новости электротехники*. 2008. № 5 (53). С. 108–114.
6. Поддубный А.А., Акимов Д.А., Юдина К.В., Николаев А.В. Анализ основных методов построения базовой нагрузки при управлении спросом // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2021. № 1 (64). С. 64–69.
7. Соловьева И.А., Дзюба А.П. Управление спросом на электропотребление на мезоуровне по показателям волатильности // *Вестник ИГЭУ*. 2017. Вып. 1. С. 76–86.
8. Малыш М.Е., Матюнина Ю.В. Оценка эффективности переноса нагрузки предприятия на ночные часы с использованием кластерного анализа // *Промышленная энергетика*. 2023. № 3. С. 38–44.
9. Гительман Л.Д., Ратников Б.Е., Кожевников М.В., Шевелев Ю.П. Управление спросом на энергию. Уникальная инновация для российской электроэнергетики. Екатеринбург: Экономика, 2013. 120 с.
10. Петров М.Б., Кожов К.Б. Модель выравнивания суточного графика нагрузки потребителями электроэнергии // *Вестник гуманитарного университета*. 2023. № 4 (43). С. 124–134.
11. АО «АТС». URL: atsenergo.ru (дата обращения: 01.07.2025).

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: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Маринова С.В. Алгоритм анализа данных для моделирования графика нагрузки электропотребления промышленного предприятия с целью снижения размера оплаты электроэнергии // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 3 (27). С. 36–47.

**DATA ANALYSIS ALGORITHM FOR GRAPH MODELING
ELECTRICITY CONSUMPTION OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE
WITH THE AIM OF REDUCING ELECTRICITY COSTS*****S.V. Marinova****Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The article notes that shifting some of the industrial enterprise's electricity consumption from hours of maximum and peak load to other time ranges can provide economic benefits by leveling the load schedule. It emphasizes that redistributing energy consumption to level the schedule not only reduces the costs of industrial enterprises for production, but also allows electricity providers to optimize the generation and transportation of energy resources.

Keywords: energy efficiency, forecasting, modeling of consumption, energy consumption, electrical load graph.

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: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Marinova S.V. Data analysis algorithm for graph modeling electricity consumption of an industrial enterprise with the aim of reducing electricity costs // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 3 (27), pp. 36–47.

УДК 531.652**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ АККУМУЛЯТОР*****В.Д. Павлов****Владимирский электромеханический завод (г. Владимир)*

© Павлов В.Д., 2025

Аннотация. В статье отмечено, что кратковременные пиковые нагрузки машин и механизмов создают необходимость в аккумулировании механической энергии для ее последующего импульсного использования. Это вполне актуально, например, для

аэродромных тягачей на стартовом этапе буксировки тяжелых самолетов. Применение аккумулятора механической энергии позволит уменьшить мощность двигателя тягача. Аккумулятор механической энергии может быть выполнен в виде электрической машины постоянного тока или вентильной, на валу которой закреплен супермаховик. При подключении электрической машины к источнику питания возникает нестационарный процесс, описываемый двумя дифференциальными уравнениями: одним – для механических величин, другим – для электрических. Аккумулятор механической энергии можно трактовать как искусственный электрический конденсатор, который запасает и отдает не энергию электрического поля, а кинетическую энергию вращения супермаховика.

Ключевые слова: тягач, нагрузка, буксировка, прицеп, аккумулятор, энергия, электрическая машина.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-47-53

ВВЕДЕНИЕ

Накопители кинетической энергии широко применяются в области техники. В первую очередь это маховики и супермаховики. Известны успешные проекты реализации последних даже в легковых автомобилях для утилизации энергии торможения и использования ее в целях последующего ускорения. Основная проблема подобного применения заключается в сложности и громоздкости устройств для трансформации и передачи механической энергии. Предлагаемое техническое решение лишено этих недостатков. Его использование оправдано в машинах с неравномерной нагрузкой (например, в тракторах и тягачах) [1–3].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Аккумулятор механической энергии может быть выполнен в виде электрической машины постоянного тока или вентильной, на валу которой закреплен супермаховик.

Когда машина подключается к источнику питания, возникает нестационарный процесс, описываемый следующими выражениями [4–6]:

$$\begin{cases} J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + k \frac{d\varphi}{dt} = B2lw \frac{D}{2} i; \\ B2lw \frac{D}{2} \frac{d\varphi}{dt} + Ri = U, \end{cases}$$

где J – момент инерции супермаховика в совокупности с собственным моментом инерции электрической машины; φ – угловое положение ротора; k – коэффициент вязкого трения; B – значение магнитной индукции [7, 8]; $2l$ – рабочая длина витка якорной обмотки; w – число витков якорной обмотки; D – диаметр якоря; R – активное сопротивление электрической цепи; U – напряжение источника питания.

Для компактности вводится обозначение

$$B2lwD = Y. \quad (1)$$

Очевидные начальные условия следующие:

$$\varphi(0) = \varphi_0; \quad \frac{d\varphi}{dt}(0) = \omega_0. \quad (2)$$

Из второго выражения системы уравнений вытекает, что

$$\begin{aligned}\frac{d\varphi}{dt} &= -\frac{R}{Y}i + \frac{U}{Y}; \\ \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= -\frac{R}{Y}\frac{di}{dt}.\end{aligned}\quad (3)$$

При подстановке в первое выражение системы уравнений получаем:

$$\begin{aligned}-\frac{JR}{Y}\frac{di}{dt} - \frac{kR}{Y}i + \frac{kU}{Y} &= Yi; \\ \frac{di}{dt} + \left(\frac{Y^2}{JR} + \frac{k}{J}\right)i &= \frac{k}{J}\frac{U}{R}.\end{aligned}$$

Для компактности вводятся обозначения:

$$\begin{aligned}\frac{Y^2}{JR} + \frac{k}{J} &= A; \\ \frac{k}{J}\frac{U}{R} &= B.\end{aligned}$$

В соответствии с этим

$$\frac{di}{dt} + Ai = B. \quad (4)$$

Общее решение этого уравнения имеет вид

$$i_1 = C_1 e^{-At}.$$

Частное решение – $i_2 = C_2$.

Из этого в сочетании с выражением (4) следует:

$$0 + AC_2 = B; \quad C_2 = \frac{B}{A}.$$

Ток в цепи имеет вид

$$i = i_1 + i_2 = C_1 e^{-At} + \frac{B}{A}. \quad (5)$$

Если иметь в виду выражения (2) и (3), то

$$i(0) = \frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R}.$$

Из этого в сочетании с выражением (5) следует, что

$$\begin{aligned}C_1 &= \frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R} - \frac{B}{A}; \\ i &= \left(\frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R} - \frac{B}{A}\right)e^{-At} + \frac{B}{A}; \\ i &= \left(\frac{U - Y\omega_0}{R} - \frac{U}{Y^2/k + R}\right)e^{-t/\tau} + \frac{U}{Y^2/k + R} = \\ &= \left(\frac{U - E_0}{R} - \frac{U}{R_k + R}\right)e^{-t/\tau} + \frac{U}{R_k + R}.\end{aligned}\quad (6)$$

Здесь $E_0 = Y\omega_0$.

$$\begin{aligned}\frac{1}{\tau} &= \frac{1}{R} \frac{1}{J/Y^2} + \frac{1}{J/k} = \frac{1}{R} \frac{1}{J/Y^2} + \frac{1}{(J/Y^2)(Y^2/k)} = \\ &= \frac{1}{RC_J} + \frac{1}{R_k C_J} = \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_m}.\end{aligned}\quad (7)$$

Если $k = 0$, $R_k = \infty$, то

$$i = \frac{U - E_0}{R} e^{-t/\tau}; \quad (8)$$

$$\tau = \frac{RJ}{Y^2} = RC_J. \quad (9)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выражения (8), (9) повторяют соотношения для зарядки электрического конденсатора.

Если соединить между собой концы якорной обмотки, то $i = \frac{-E_0}{R} e^{-t/\tau}$. Это выражение повторяет соотношение для разрядки электрического конденсатора.

Из формул (6)–(9) следует, что для электрической цепи рассматриваемый аккумулятор механической энергии неотличим от электрического конденсатора.

Таким образом, в данном случае можно вести речь об искусственной электрической емкости [9, 10], которая выглядит как $C_J = \frac{J}{Y^2}$.

Кроме того, возникает искусственное электрическое сопротивление (которое не связано с удельным сопротивлением, длиной и площадью сечения проводников) $R_k = \frac{Y^2}{k}$.

Аккумулятор механической энергии накапливает энергию

$$W = \frac{C_J U^2}{2} = \frac{JU^2}{2Y^2} = \frac{J\omega^2}{2}.$$

Эквивалентная электрическая схема аккумулятора механической энергии представлена на рис. 1.

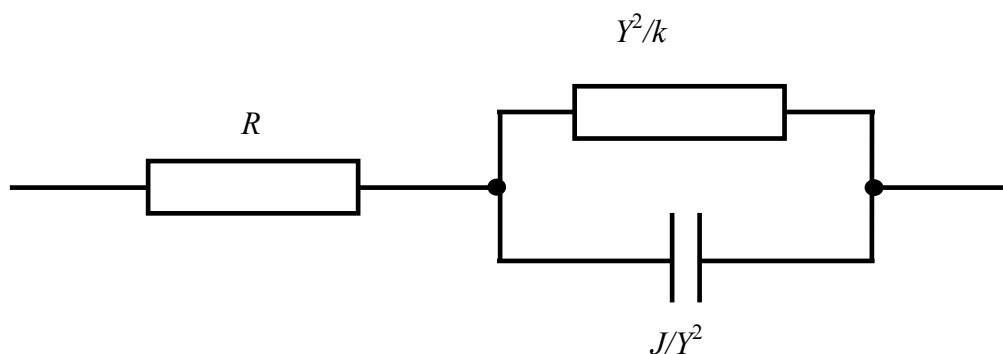


Рис. 1. Электрическая схема аккумулятора механической энергии

На рис. 2 показан график тока зарядки/разрядки искусственной электрической емкости.

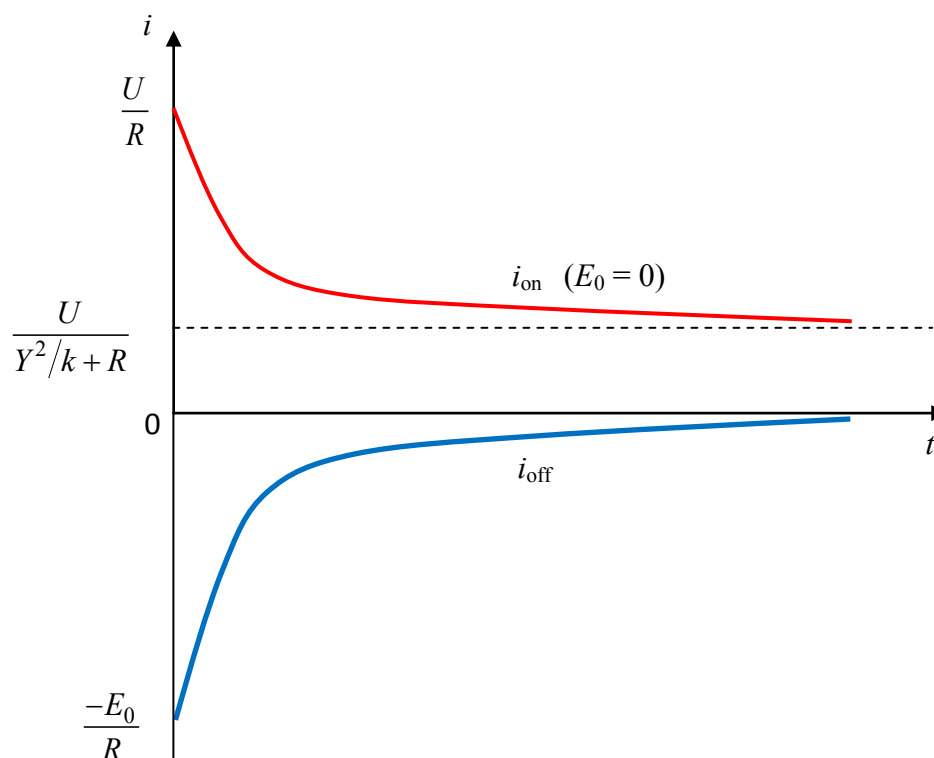


Рис. 2. Характер тока при зарядке и разрядке искусственной электрической емкости

В связи с изложенным аккумулятор механической энергии можно трактовать как искусственный электрический конденсатор, который запасает не энергию электрического поля, а кинетическую энергию вращения супермаховика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Есть конструкции супермаховиков, способные запастись существенный объем кинетической энергии. Изучалась даже возможность их установки на легковом транспорте. В этом смысле массивные тягачи имеют бесспорное преимущество, поскольку увеличение веса для них не только не проблематично, но и желательно в некоторых случаях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов В.Д. Решение задачи трогания многозвенного транспортного средства методами теоретической механики // *Вестник НФ БГТУ: мехмат.* 2022. Т. 2. № 4 (08). С. 4–14. DOI: 10.51639/2713-0657_2022_2_4_4
2. Павлов В.Д. Начальная динамика тягача с массивными буксируемыми объектами // *Справочник. Инженерный журнал с приложением.* 2023. № 4. С. 31–37. DOI: 10.14489/hb.2023.04.pp.031-037

3. Павлов В.Д.. Тягово-цепное устройство для преодоления силы трения покоя // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2023. № 2. С. 51–57. DOI: 10.36652/0202-3350-2023-24-2-51-57
4. Павлов В.Д. Немеханический момент инерции в системе ориентирования космического аппарата // *Прикладная физика и математика*. 2022. № 3. С. 3–5. DOI: 10.25791/pfim.03.2022.1227
5. Павлов В.Д. Маховик с электромагнитным моментом инерции // *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. 2022. № 9 (306). С. 53–55. DOI: 10.14489/hb.2022.09.pp.053-055
6. Попов И.П. Электромеханический маховик с искусственным (емкостным) моментом инерции // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 58–63. DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-58-63
7. Павлов В.Д. Магнитный поток и его квантование // *Известия Уфимского научного центра РАН*. 2020. № 4. С. 25–28. DOI: 10.31040/2222-8349-2020-0-4-25-28
8. Павлов В.Д. Интерпретация результатов измерения кванта магнитного потока // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 1 (25). С. 61–67. DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-61-67
9. Павлов В.Д. Управляемая искусственная упругость в мехатронных системах // *Автоматизированные технологии и производства*. 2022. № 1 (25). С. 20–22.
10. Попов И.П. Приоритет электродинамики над механикой на примере второго закона Ньютона // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 3 (23). С. 62–69. DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-62-69

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. Электромеханический аккумулятор // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 3 (27). С. 47–53.

ELECTROMECHANICAL BATTERY

V.D. Pavlov

Vladimir Electromechanical Plant (Vladimir)

Abstract. The article notes that short-term peak loads on machines and mechanisms create the need to accumulate mechanical energy for subsequent impulse use. This is quite relevant, for example, for airfield tractors at the starting stage of towing heavy aircraft. The use of a mechanical energy accumulator will reduce the power of the tractor engine. The mechanical

energy accumulator can be made in the form of a direct current or valve electric machine, on the shaft of which a super flywheel is fixed. When connecting an electric machine to a power source, a non-stationary process occurs, described by two differential equations: one for mechanical quantities, the other for electrical ones. The mechanical energy accumulator can be interpreted as an artificial electric capacitor that stores and gives off not the energy of the electric field, but the kinetic energy of the super flywheel rotation.

Keywords: tractor, load, towing, trailer, battery, energy, electric machine.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Pavlov V.D. Electromechanical battery // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 3 (27), pp. 47–53.

УДК 537.611

СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ МОНОПОЛЕЙ И СИЛОВЫЕ ЛИНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

И.П. Попов

Курганский государственный университет (г. Курган)

© Попов И.П., 2025

Аннотация. В статье изложено дополнение к ранее установленному факту, что магнитные заряды $\mu = q\mathbf{v}$, $\mu_e = -e\mathbf{v}$, $d\mu = Id\mathbf{l}$ создают потенциальное сферическое магнитное поле, которое удовлетворяет теореме Гаусса. Указано, что силовые линии магнитного поля исключительно радиальные, т.е. начинаются на одном магнитном заряде и заканчиваются на другом. Между соосными магнитными зарядами $\mu = q\mathbf{v}$, $\mu_e = -e\mathbf{v}$, $d\mu = Id\mathbf{l}$ действуют силы, как и между параллельными. Отмечено, что теория магнитных монополей и зарядов лучше удовлетворяет экспериментальным данным, чем классическая электродинамика. Это касается осевого взаимодействия и третьего закона Ньютона.

Ключевые слова: магнитный монополь, магнитный заряд, магнитное поле, силовые линии, дивергенция, электродинамика, осевое взаимодействие.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-53-60

ВВЕДЕНИЕ

Представление магнитных монополей Дирака, Хофта – Полякова, Уруцкоева и других не вызывает сомнения.

Представление магнитных монополей в виде [1]

$$\mu = q\mathbf{v}; \quad (1)$$

$$\mu_e = -ev; \quad (2)$$

$$d\mu = Idl, \quad (3)$$

где q – электрический заряд; v – скорость; e – заряд электрона; I – электрический ток; dl – элемент проводника, вызвало критику у научного сообщества. При этом монополи Дирака, Хофта – Полякова, Уруцкоева и прочие в природе не существуют, а монополи (1)–(3) широко распространены.

Целью работы является освещение не раскрытых в источнике [1] свойств магнитных зарядов (1)–(3) в связи с возникшими конструктивными критическими замечаниями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Аргументы и контраргументы

Первый аргумент критики: гравитационный и электрический заряды являются скалярами, а величины (1)–(3) – векторами, поэтому они ((1)–(3)) не могут быть зарядами.

Контраргумент. Если бы эта логика работала, тогда из того обстоятельства, что гравитационный и электростатический потенциалы являются скалярами, следовало бы, что векторный потенциал не может быть потенциалом.

Второй аргумент критики: автор называет магнитным зарядом то (элемент электрического тока), что им не является (хотя бы потому, что введенная автором величина не сохраняется).

Контраргумент. Электрический заряд тоже не сохраняется (при аннигиляции электрона и позитрона). Гравитационный заряд не сохраняется (дефект массы и аннигиляция), что не мешает электрическому и гравитационному зарядам оставаться именно зарядами.

Третий аргумент критики: силовые линии (например, электростатического поля) начинаются и заканчиваются на электрических зарядах, а силовые линии магнитного поля, обусловленные протеканием тока по проводнику, представляют собой замкнутые линии вокруг проводника.

Контраргумент. Поскольку одной фразой ответ не сформулировать, ему отводится следующая часть статьи.

О силовых линиях

Силовая линия поля – это линия, вдоль которой направлена сила, действующая со стороны поля на заряд.

На рис. 1 показано силовое взаимодействие двух монополей с зарядами $I_1 dl_1$ и $I_2 dl_2$ посредством магнитного поля [1].

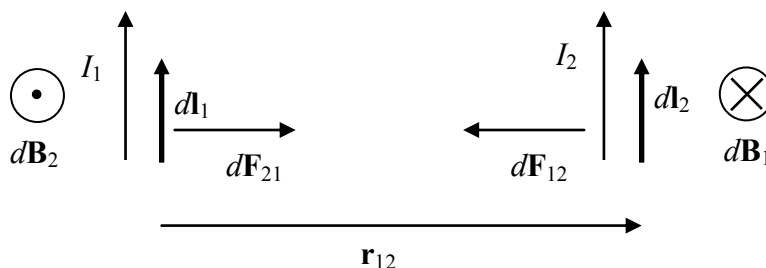


Рис. 1. Взаимодействие магнитных монополей

Не вызывает разночтений тот факт, что силовая линия, необходимо совпадающая с направлением силы, начинается на одном магнитном заряде и заканчивается на другом.

Несмотря на то, что линии $d\mathbf{B}_1$ и $d\mathbf{B}_2$ (их следы обозначены \otimes и \ominus) долгое время называются силовыми, на самом деле они таковыми не являются. Это эквипотенциальные линии.

Данное заблуждение возникло из-за школьных опытов по визуализации силовых линий с помощью железных опилок.

На рис. 2 показаны силы взаимодействия между током I , протекающим в вертикальном элементе проводника $d\mathbf{l}$, и эквивалентным круговым микротоком I_{12} в опилке, протекающим в элементах $d\mathbf{l}_1$ и $d\mathbf{l}_2$.

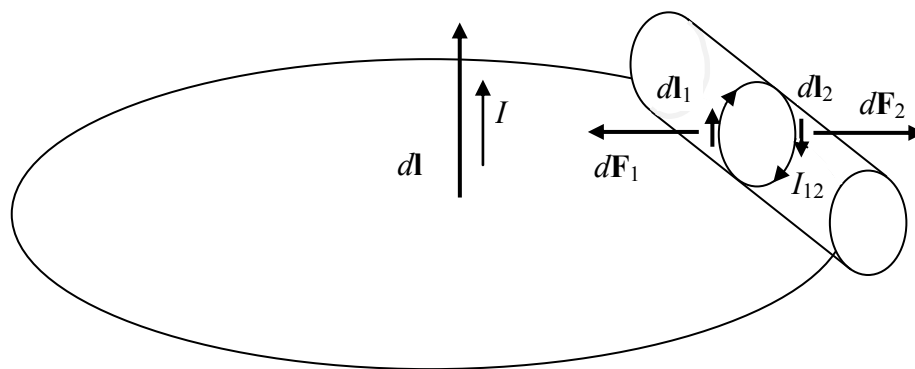


Рис. 2. Ориентация железных опилок

Фактические силы $d\mathbf{F}_1$ и $d\mathbf{F}_2$ являются радиальными. Именно эта пара сил ориентирует опилку под прямым углом к радиусу.

При этом у школьников создается иллюзия возникновения другой пары сил, якобы тянущих опилку за концы в противоположных направлениях вдоль окружности, на основе чего формируется устойчивый миф о вихревом характере статического магнитного поля.

Концентрическими являются ориентации опилок. В этом направлении (круговом) не действуют никакие силы. Поэтому в этой ситуации круговых силовых линий быть не может. Силовые линии исключительно радиальные, т.е. начинаются на одном магнитном заряде и заканчиваются на другом.

Аргументы и контраргументы

Четвертый аргумент критики: при наличии электрических зарядов в исследуемом объеме в теореме Гаусса правая часть не равна 0, а при записи принципа непрерывности силовых линий магнитного поля в правой части всегда 0.

Контраргумент одной фразой не сформулировать, поэтому ему отводится следующая часть статьи.

Дивергенция магнитного поля

Поскольку статическое магнитное поле является не вихревым, а радиальным, совершенно неудивительно, что для него правая часть теоремы Гаусса не может равняться нулю.

В источнике [1] показано, что между соосными магнитными зарядами (1)–(3) действует сила, как и между параллельными. В связи с этим не вызывает вопросов то, что дифференциал магнитного заряда (1)–(3) создает потенциальное сферическое магнитное поле, которое, безусловно, удовлетворяет теореме Гаусса. Это строго доказано в источнике [2].

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \left\{ \sum I \Delta l + \sum I_{\text{см}} \Delta l \right\};$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B}_r^{\left\{ \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right\}} = \nabla \cdot \mathbf{B}_r^{\left\{ \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right\}} = \left\{ \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right\};$$

$$\left\{ \operatorname{div} \mathbf{B}_r^{\left\{ \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right\}} \right\} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}.$$

Фигурные скобки здесь являются частью формализма векторной алгебры применительно к рассматриваемому случаю [2].

Аргументы и контраргументы

Пятый аргумент критики: несмотря на все попытки найти частицы с магнитным зарядом, они так и не были обнаружены.

Контраргумент. Магнитные монополи обнаружены [1]. На основе (1)–(3) можно сделать вывод, что эти объекты реально существуют.

Шестой аргумент критики: классическая электродинамика основывается на уравнениях Максвелла, определяющих поля E и H по заданному распределению токов и зарядов, и на выражении для силы Лоренца, определяющем силу, действующую на движущийся заряд со стороны полей E и H . Эти соотношения есть результат обобщения бесчисленного множества экспериментальных данных. Поэтому модификация какого-либо из этих соотношений (наподобие формулы (1)) будет противоречить эксперименту почти наверняка.

Контраргумент. Теория Максвелла противоречит результатам экспериментов, выполненных Ампером [3], установившим взаимодействие соосных токов. Элементы теории магнитных зарядов [1] не противоречат экспериментальным данным.

Седьмой аргумент критики: в работе не приводится никакого сравнения модифицированной теории с экспериментом.

Контраргумент. Сравнение приводится: одноименные магнитные заряды притягиваются друг к другу, а разноименные отталкиваются [1].

Восьмой аргумент критики: действительно, для элементов тока двух проводников третий закон Ньютона не соблюдается. Однако элементы тока не являются самостоятельными объектами. Как нетрудно убедиться, для двух замкнутых электрических цепей третий закон Ньютона соблюдается.

Контраргумент. Заряженные космические частицы являются самостоятельными объектами. Они не являются замкнутыми электрическими цепями. Для них третий закон Ньютона не соблюдается, и этому нет никакого объяснения.

Девятый аргумент критики: статья не актуальна. Все, что связано с магнитными зарядами, уже было исследовано.

Контраргумент. Все, что касается магнитных зарядов, не могло быть исследовано, так как до публикации статьи [1] не были описаны сами магнитные заряды. То, что было описано ранее (монополи Дирака, Хофта – Полякова, Уруцкоева и др.), в природе не существует (в отличие от (1)–(3)).

Десятый аргумент критики: то, что автор назвал Idl магнитным зарядом, принято называть элементом тока.

Контраргумент. Здесь нет никакого противоречия. То, что принято называть камнем, древние считали оружием. Как принято называть $\mu = qv$, тоже называемый автором магнитным зарядом? Данный вопрос является риторическим.

Одиннадцатый аргумент критики: согласно определению, магнитный монополь есть частица (возможно, элементарная), представляющая из себя однополюсный магнит.

Контраргумент. Определение может описывать сложное понятие более простыми элементами (не наоборот). Данное определение некорректное, так как оно описывает простое (возможно, элементарное) понятие «магнитный монополь» сложным понятием «магнит» (представляющий собой суперпозицию орбитальных и спиновых магнитных потоков). Иначе: магнит – это суперпозиция магнитных монополей. Так же, как и дом, это композиция из кирпичей. Дом с помощью кирпичей определить можно, а кирпич через дом – нет. То же и с магнитом.

Корректным и унифицированным определением является следующее.

(*) *Магнитный заряд – это физический объект, создающий магнитное поле и взаимодействующий посредством него с другими магнитными зарядами.*

Можно заменить слово «магнитный» на «электрический» или «гравитационный». Получатся корректные определения соответствующих зарядов [4–7].

Двенадцатый аргумент критики: в работе предложена модель монополя, которая не соответствует общепринятому определению (тому, где магнит).

Контраргумент. И это правильно, поскольку оно (определение) вызывает много нареканий (см. выше).

Тринадцатый аргумент критики: простой аналогии между законом Кулона, законом всемирного тяготения и, соответственно, законом Ампера недостаточно для того, чтобы получить магнитный заряд.

Контраргумент. Возникает вопрос: почему это так?

Кроме того, аналогия не такая простая. Она полностью соответствует определению (*) [8–11], что является достаточным условием.

Четырнадцатый аргумент критики: ...и отсюда определяется магнитный заряд как $\mu = qv$. Но в определении магнитного заряда стоит скорость его движения, следовательно, его величина зависит от выбора системы отсчета, а это неприемлемо.

Контраргумент.

Масса электрона

$$m_e = \frac{e^2 \mu_0}{4\pi a_0 \alpha^2}.$$

Отсюда заряд электрона

$$e = \frac{2\pi^{0,5} a_0^{0,5} \alpha m_e^{0,5}}{\mu_0^{0,5}}.$$

Однако

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}.$$

Существует непринятие этой формулы. Тем не менее ее несостоятельность не доказана, так что отрицание преждевременно.

В результате

$$e = \frac{2\pi^{0,5} a_0^{0,5} \alpha m_e^{0,5}}{\mu_0^{0,5}} \frac{1}{(1-v^2/c^2)^{0,25}}.$$

Другими словами, величина электрического заряда тоже зависит от скорости, а следовательно, от выбора системы отсчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе аргументов критики (в дополнение к изложенному в статье [1]) установлено, что магнитные заряды (1)–(3) создают потенциальное сферическое магнитное поле, которое, безусловно, удовлетворяет теореме Гаусса, а именно: поток вектора магнитной индукции сквозь произвольную замкнутую поверхность равен векторной сумме заключенных внутри этой поверхности магнитных зарядов.

Силовые линии магнитного поля, начинающиеся на одном магнитном заряде и заканчивающиеся на другом, являются радиальными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.П. Магнитный заряд. Осевое взаимодействие проводников с токами // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 1 (25). С. 67–73. DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-67-73
2. Popov I.P. Combined Vectors and Magnetic Charge // *Technical Physics*. 2024. V. 69. No. 8, pp. 2397–2405. DOI: 10.1134/S1063784224700415
3. Ампер А.М. Электродинамика. М.: АН СССР, 1954. 492 с.
4. Popov I.P. Full Account of the Energy of the Gravitational Field in Cosmology and Spacecraft Ballistics // *Technical Physics*. 2024. Vol. 69. No. 1, pp. 53–56. DOI: 10.1134/S1063784224700300
5. Попов И.П. Полный учет энергии электростатического поля заряженных сфер // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 1 (21). С. 45–56. DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-45-56
6. Попов И.П. Приоритет электродинамики над механикой на примере второго закона Ньютона // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 3 (23). С. 62–69. DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-62-69
7. Попов И.П. Расчет полной энергии электростатического поля // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2020. Т. 2. № 392. С. 107–114. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-107-114

8. Попов И.П. Запасаемая электростатическая энергия // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2020. № 33. С. 195–210. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.12
9. Попов И.П. Постоянная интегрирования энергии электростатического поля // *Вестник Псковского государственного университета. Естественные и физико-математические науки*. 2021. Вып. 17. С. 108–120.
10. 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. DOI: 10.18503/2306-2053-2020-8-1-2-9
11. Попов И.П. Энергия электростатического поля заряженных непроводящих шаров // *Вестник Таганрогского института им. А.П. Чехова*. 2021. № 2. С. 27–35.

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. Свойства магнитных монополей и силовые линии магнитного поля // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 3 (27). С. 53–60.

PROPERTIES OF MAGNETIC MONOPOLES AND MAGNETIC FIELD LINES OF FORCE

I.P. Popov

Kurgan State University (Kurgan)

Abstract. In addition to the above, it has been established that magnetic charges $\mu = qv$, $\mu_e = -ev$, $d\mu = Idl$ create a potential spherical magnetic field, which certainly satisfies the Gauss theorem. The lines of force of the magnetic field are exclusively radial, i.e. they begin at one magnetic charge and end at another. Between coaxial magnetic charges $\mu = qv$, $\mu_e = -ev$, $d\mu = Idl$, the same forces act as between parallel ones. The theory of magnetic monopoles and charges satisfies experimental data better than classical electrodynamics. This concerns axial interaction and Newton's third law.

Keywords: magnetic monopole, magnetic charge, magnetic field, lines of force, divergence, electrodynamics, axial interaction.

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 street, Kurgan, 640020, Russia. E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Popov I.P. Properties of magnetic monopoles and magnetic field lines of force // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 3 (27), pp. 53–60.

УДК 621.311.21

**РЕШЕНИЕ ВОПРОСА МЕСТНОГО ДЕФИЦИТА МОЩНОСТИ
В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ С ПОМОЩЬЮ МАЛЫХ ГЭС**

А.А. Рахманов, А.Ю. Русин

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Рахманов А.А., Русин А.Ю., 2025

Аннотация. Статья посвящена проблеме устранения местного дефицита мощности в энергосистемах России с помощью малых гидроэлектростанций (ГЭС). Проведен анализ эффективности малых ГЭС как автономных источников энергоснабжения для отдаленных регионов. Рассмотрены возможности применения малых ГЭС для обеспечения электроэнергией предприятий малого и среднего бизнеса. Показано, что использование малой гидроэнергетики для локального энергоснабжения экономически целесообразно и экологически оправдано. Отмечено, что внедрение малых ГЭС снижает нагрузку на магистральные электросети и повышает энергетическую автономность отдаленных регионов.

Ключевые слова: малая гидроэлектростанция, гидроэнергетика, дефицит мощности, обособленные энергосистемы, производство электроэнергии, малый и средний бизнес.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-60-67

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос дефицита мощности в локальных энергосистемах России приобретает особую актуальность на фоне устаревания и износа инфраструктуры. По данным исследований, степень износа основных фондов в электроэнергетике в ряде регионов достигает критических значений: более 50 % оборудования и сетей требуют модернизации или замены [1]. Подстанции и линии электропередачи (ЛЭП) зачастую работают на пределе своих возможностей, что ограничивает пропускную способность и резервные мощности, а также усугубляет проблему подключения новых потребителей.

Для малого и среднего бизнеса (МСБ) данная ситуация становится особенно ощутимой. Высокие затраты на подключение к электросетям, сложные бюрократические процедуры и длительные сроки реализации проекта подключения создают значительные барьеры для развития предпринимательства [2]. В результате предприятия вынуждены искать альтернативные решения, чтобы обеспечить свои потребности в электроэнергии. При этом рост тарифов на электроэнергию и степень износа инфраструктуры значительно увеличивают экономическую нагрузку на бизнес и население [1–3].

Определим средние цены производителей на электроэнергию по категориям потребителей за 2018–2022 годы (рисунок).



Средние цены производителей на электроэнергию
по категориям потребителей (2018–2022 годы) [1]

Из рисунка видно, что основной доход для энергосбытовых компаний приносят сельскохозяйственные производители и промышленные предприятия. С другой стороны, развитие малой энергетики, включая микрогидроэлектростанции (микро-ГЭС), представляет собой перспективное направление для решения проблемы локального дефицита мощности. Микро-ГЭС обладают рядом преимуществ, таких как минимальные эксплуатационные затраты, экологичность и независимость от поставок топлива.

Малые ГЭС – это эффективное решение для снабжения электроэнергией удаленных предприятий и населенных пунктов, где строительство линий электропередачи является слишком затратным. Эти станции используют энергию течения небольших рек и ручьев для выработки стабильного электричества с высоким качеством, соответствующим требованиям к частоте и напряжению. Благодаря современным технологиям такие станции имеют высокий уровень автоматизации, что позволяет им работать как автономно, так и в составе единой энергосистемы. Это делает малые ГЭС универсальным и надежным источником энергии для объектов малой мощности [2].

Согласно данным, около 50 % территории России остается вне зоны централизованного электроснабжения [4]. В таких регионах локальные решения генерации электроэнергии, включая малые ГЭС, могут стать основным элементом обеспечения надежного энергоснабжения. Это особенно актуально для сельскохозяйственных и производственных предприятий, расположенных в удаленных районах, а также для поселений с ограниченной инфраструктурой.

Внедрение микро-ГЭС как элемента малой энергетики является эффективным способом решения проблемы локального дефицита мощности. В данной статье рассматриваются основные аспекты применения микро-ГЭС, экономическая целесообразность их внедрения и перспективы развития малой гидроэнергетики в России. Особое внимание уделяется возможностям локального энергоснабжения для МСБ, а также потенциалу использования микро-ГЭС в труднодоступных и удаленных регионах.

ПРОБЛЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Как уже говорилось, одним из значимых препятствий для развития МСБ в России является сложность подключения к централизованным энергосетям. Высокая стоимость, трудность согласования и длительные сроки реализации создают барьеры, сдерживающие региональную экономику. Даже в регионах с относительно низкими расходами (например, в Ульяновской области) стоимость прокладки новых ЛЭП длиной 1 км может превышать 300 000 рублей. Кроме того, эти расходы не являются единственными при подключении [5].

Для частных домов ситуация также ухудшается. С 1 июля 2024 года стоимость подключения к сетям составит не менее 5 570 рублей, максимум – 11 140 рублей за каждый киловатт мощности, что при необходимости подключения стандартных 15 кВт обойдется более чем в 83 550 рублей. Однако это не все затраты: кроме платы за мощность, потребителю нужно оплачивать дополнительные работы, такие как установка щитков, прокладка кабелей от опоры к дому и обустройство электрического ввода [6]. Эти растущие затраты делают централизованное энергоснабжение менее доступным, особенно для частных лиц и малых предприятий в удаленных регионах.

Для обособленных регионов (горных районов Алтая или Крайнего Севера) энергоснабжение остается сложной задачей. Основными потребителями энергии в этих зонах выступают сельскохозяйственные объекты: чабанские бригады, небольшие животноводческие фермы и поселки. В настоящее время для таких объектов используются сельские ЛЭП и передвижные дизель-электрические станции (ДЭС). Однако их использование сопровождается рядом трудностей.

Линии электропередачи в таких районах проектируются с увеличенным сечением проводов. Это обусловлено необходимостью обеспечения их механической прочности для устойчивости в сложных условиях, таких как гористая местность или суровые климатические условия. Однако это решение приводит к избыточной пропускной способности, которая в 10–30 раз превышает реальную потребность в энергии. В результате затраты на строительство и эксплуатацию ЛЭП значительно возрастают, что делает их экономически малоэффективными для рассредоточенных потребителей [7].

Использование ДЭС, в свою очередь, также не решает проблему энергоснабжения. Высокая стоимость доставки топлива в труднодоступные регионы, а также сложность их эксплуатации в экстремальных условиях приводят к значительным затратам. Вместе эти факторы усиливают необходимость внедрения альтернативных автономных решений, таких как микро-ГЭС, которые способны обеспечить надежное энергоснабжение с минимальными эксплуатационными издержками.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИКРО-ГЭС

Для проектирования и эксплуатации микро-ГЭС нужно учитывать ряд факторов, которые напрямую влияют на их эффективность и экономическую целесообразность.

1. Скорость потока воды.

Высокая скорость потока повышает энергоэффективность станции, так как позволяет получить больше энергии на единицу воды. Рекомендуемая скорость потока для микро-ГЭС составляет от 1 до 2 м/с.

При низкой скорости (менее 1 м/с) часто требуется создание дополнительных условий (например, обводного канала переменного сечения или искусственного перепада высот) [8].

2. Напор воды.

Напор воды – это разница в высотах между местом забора воды и выходом ее из турбины. Высоконапорные микро-ГЭС (более 60 м) обеспечивают максимальную энергоотдачу и чаще всего применяются в горных районах. Средненапорные (25–60 м) и низконапорные (3–25 м) установки подходят для равнинных рек [8].

3. Расход воды.

Расход воды, измеряемый в кубических метрах в секунду, определяет объем воды, который проходит через турбину за единицу времени. Это ключевой показатель для выбора типа и мощности станции.

4. Рельеф местности.

Горные районы с естественными перепадами высот (Алтай, Камчатка, Кавказ) идеально подходят для высоконапорных микро-ГЭС, что снижает затраты на создание искусственных условий.

В равнинных районах (например, в Центральной России) используются низконапорные ГЭС, которые требуют более значительных капиталовложений для создания напорных резервуаров и плотин.

5. Сезонность и стабильность потока.

Для постоянной выработки энергии важна стабильность речного стока. Например, в северных регионах России сезонность работы рек (ледостав зимой) ограничивает использование микро-ГЭС, тогда как в южных районах сток остается стабильным в течение всего года [9].

6. Экологические и инфраструктурные аспекты.

Микро-ГЭС должны быть интегрированы в экосистему реки с минимальным воздействием на окружающую среду. Особое внимание уделяется рыбоходам и сохранению природного ландшафта [9].

Близость к объектам потребления (сельскохозяйственным фермам, малым производствам) способствует снижению затрат на передачу энергии.

ПОТЕНЦИАЛ МИКРО-ГЭС ДЛЯ ТРУДНОДОСТУПНЫХ РАЙОНОВ. ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА РОССИИ

Российская Федерация обладает уникальными гидрологическими условиями, которые делают ее одной из ведущих стран по потенциалу малой гидроэнергетики. В стране насчитывается более 2 500 000 рек общей протяженностью свыше 8 000 000 км. При этом 90 % рек имеют длину менее 100 км [10], что позволяет отнести их к категории малых рек. Они не только составляют основу гидрографической сети, но и играют ключевую роль в развитии местной экономики, обеспечивая водные ресурсы для сельского хозяйства, промышленности и коммунального хозяйства.

Несмотря на огромный гидрологический потенциал, для хозяйственных нужд используется менее 2 % суммарного водостока страны [11]. Это свидетельствует о значительных резервах, которые могут быть задействованы для решения проблем локального энергодефицита, особенно в труднодоступных и обособленных районах.

Большинство малых рек расположено в таких регионах, как Восточная Сибирь, Камчатка, Алтай и Якутия. Эти территории характеризуются значительными перепадами высот, что создает благоприятные условия для строительства микро-ГЭС.

Алтай: горный рельеф обеспечивает постоянные перепады высот, что делает реки региона идеальными для малой гидроэнергетики.

Якутия: несмотря на сезонный характер рек, в южных районах республики они остаются свободными ото льда в течение 5–6 месяцев, что дает возможность снабжать энергией малые поселения [9].

Камчатка: реки региона обладают мощным течением благодаря высокогорным ледникам, что делает их подходящими для разработки гидроэнергетических проектов.

Свердловская область, например, насчитывает более 18 000 рек общей протяженностью около 68 000 км. Этот регион представляет собой один из ключевых примеров доступности малых рек для гидроэнергетики. Реки здесь обладают достаточной пропускной способностью и стабильным течением, что позволяет эффективно использовать их для микро-ГЭС [2]. Кроме того, значительная часть малых рек находится в районах, где отсутствует централизованное электроснабжение, что делает их естественными точками для внедрения автономных энергетических решений. Если учесть минимальные затраты на строительство и эксплуатацию микро-ГЭС, то использование этих ресурсов открывает возможности для обеспечения локального энергоснабжения и устойчивого развития регионов.

Малые реки с их постоянными потоками и перепадами высот представляют собой идеальную основу для внедрения малых ГЭС, особенно в труднодоступных регионах. Это позволяет не только обеспечить автономное энергоснабжение, но и эффективно использовать природные ресурсы, минимизируя затраты на транспортировку топлива и строительство инфраструктуры.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ МИКРО-ГЭС

Малые ГЭС позволяют существенно сократить затраты на строительство ЛЭП. Их возведение требует меньших капитальных вложений, что упрощает привлечение инвесторов и делает проекты более доступными для реализации. Благодаря компактности и технологической простоте малые ГЭС являются менее трудозатратными в сравнении с крупными ГЭС [7, 9].

Примером экономической эффективности малых ГЭС может служить опыт Таджикистана, где строительство станции мощностью 500 кВт обходится в среднем в 15 000 000 рублей [12]. Срок окупаемости таких проектов составляет от 5 до 7 лет, что делает их привлекательными как для МСБ, так и для локальных сообществ [9, 12]. Кроме того, строительство и ввод в эксплуатацию малых ГЭС занимают меньше времени в сравнении с крупными гидроэнергетическими объектами, что ускоряет их интеграцию в региональную энергосистему.

Несмотря на то что стоимость выработки 1 кВт энергии на микро-ГЭС выше, чем на средних и крупных ГЭС, их преимущества в автономности и низких эксплуатационных затратах делают их идеальным решением для локального энергоснабжения [7, 12]. Это особенно актуально в условиях, когда прокладка новых ЛЭП или транспортировка топлива экономически нецелесообразны.

Микро-ГЭС становятся оптимальным решением для локального энергоснабжения по следующим причинам:

1. Низкие капитальные затраты. Средняя стоимость строительства микро-ГЭС значительно ниже, чем затраты на прокладку ЛЭП в труднодоступные регионы.

Примером успешного внедрения микро-ГЭС является опыт Беларуси, где такие станции позволяют снизить потери электроэнергии при передаче и повысить надежность энергоснабжения транспортной инфраструктуры [13].

2. Надежность и автономность. Современные микро-ГЭС имеют высокий уровень автоматизации и могут работать как автономно, так и в составе энергосистемы.

3. Экологическая устойчивость. Микро-ГЭС минимизируют влияние на окружающую среду, сохраняя природный рельеф, и обеспечивают возможность использования водоемов для хозяйственных нужд [8, 9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микро-ГЭС представляют собой эффективное решение для устранения дефицита мощности в локальных энергосистемах. Их внедрение позволяет обеспечить энергоснабжение в труднодоступных регионах, поддержать развитие МСБ и снизить нагрузку на централизованные сети. Совместные усилия государства и частного сектора помогут раскрыть полный потенциал малой гидроэнергетики в России и поспособствовать ее устойчивому развитию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Росстат: официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/14304> (дата обращения: 20.08.2025).
2. Бояринов А.Ю., Теслюк Л.М., Дукмасова Н.В. Возобновляемые источники энергии как инструмент развития малого и среднего бизнеса в России // *Инновационное развитие экономики*. 2018. № 3 (45). С. 21–29.
3. Баранова Л.В. Техничко-технологическая безопасность как структурный компонент экономической безопасности предприятий электроэнергетики. *Актуальные вопросы экономики, менеджмента и инноваций: Материалы Международной научно-практической конференции ученых, специалистов, преподавателей вузов, аспирантов, студентов (Нижний Новгород, 23 ноября 2023 г.) / под ред. М.М. Фроловой, С.М. Дмитриева*. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2024. С. 8–12.

4. Кожевников М.В., Двинянинов А.А., Сапожников Н.Г. Институциональные барьеры развития малой энергетики России // *Journal of New Economy*. 2024. Т. 25. № 1. С. 38–47.
5. Регион Электро. URL: <http://www.regionelektro.ru/price.html> (дата обращения: 21.08.2025).
6. Сколько стоит подключить частный дом к электросетям в 2024 году. URL: <https://journal.tinkoff.ru/news/new-3000/> (дата обращения: 21.08.2025).
7. Семкин Б.В. Стальная М.И., Свит П.П. Использование возобновляемых энергоресурсов в малой энергетике // *Теплоэнергетика*. 1996. № 2. С. 6–7
8. Мини ГЭС. Микрогидроэлектростанции. URL: <https://www.rina.pro/napravleniya-deyatelnosti/alternativnaya-energetika/mikro-gidro-elektrostantsii> (дата обращения: 21.08.2025).
9. Малик Л.К. ГЭС на малых реках России: достоинства и недостатки // *Природа*. 2003. № 1 (1049). С. 55–62.
10. Реки России. URL: <https://waterresources.ru/country/reki-rossiya/> (дата обращения: 21.08.2025).
11. Родзевич Н.Н. Региональные конфликты водопользования. URL: https://geo.1sept.ru/view_article.php?ID=200902302 (дата обращения: 21.08.2025).
12. Фаязова М.А., Клочкова А.В. Строительство малых гидроэлектростанций в Таджикистане как стратегия выхода страны из энергетического кризиса. *Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО: Материалы XLIX научной и учебно-методической конференции, 29 января – 01 февраля 2020 года, Санкт-Петербург / под ред. И.В. Баранова*. СПб.: Национальный исследовательский университет ИТМО, 2020. Т. 5. С. 350–353.
13. Гончаров И.П., Ермоленко С.В., Ляхов С.В. Опыт использования объектов малой энергетики организациями Минтранса. *Энергетика Беларуси – 2022: Материалы Республиканской научно-практической конференции (Минск, 25–26 мая 2022 г.)*. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2022. С. 99–102.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РАХМАНОВ Арсений Анатольевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: dimasementev70733@gmail.com

РУСИН Александр Юрьевич – 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: alexrusin@inbox.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Рахманов А.А., Русин А.Ю. Решение вопроса местного дефицита мощности в энергосистеме с помощью малых ГЭС // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 3 (27). С. 60–67.

**SOLVING ISSUE OF LOCAL POWER SHORTAGE IN ENERGY SYSTEM
WITH HELP OF A SMALL SCALE HYDROELECTRIC POWER PLANT**

A.A. Rakhmanov, A.Yu. Rusin
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article addresses the elimination of local capacity deficits in Russia's power systems through the deployment of small hydroelectric power plants. It analyses the efficiency of small hydropower facilities as autonomous energy sources for remote regions and explores their application in supplying electricity to small and medium-sized enterprises. The study demonstrates that using small hydropower for local energy supply is both economically viable and environmentally justified. It is noted that the introduction of small hydropower plants reduces the load on trunk power grids and enhances the energy autonomy of remote areas.

Keywords: small hydroelectric power plant, hydropower, power shortage, isolated power systems, electricity generation, small and medium-sized businesses.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

RAKHMANOV Arseniy Anatolyevich – Master's Degree Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: dimasementev70733@gmail.com

RUSIN Aleksandr Yur'evich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: alexrusin@inbox.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Rakhmanov A.A., Rusin A.Yu. Solving issue of local power shortage in energy system with help of a small scale hydroelectric power plant // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 3 (27), pp. 60–67.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 544.4.032.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЙ РЕАГИРУЮЩИХ МОЛЕКУЛ В ОДНОМЕРНОМ КАНАЛЕ ЦЕОЛИТА H-ZSM-5 ДЛЯ ПРОЦЕССА ТРАНСФОРМАЦИИ СПИРТОВ В УГЛЕВОДОРОДЫ

А.А. Курагин, А.И. Пичугина, Н.В. Лакина, М.Г. Сульман, В.Ю. Долуда
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Курагин А.А., Пичугина А.И., Лакина Н.В.,
Сульман М.Г., Долуда В.Ю., 2025

Аннотация. Представлены результаты расчетов, показывающих зависимость между объемной молекулярной плотностью и соотношением различных типов столкновений молекул в реакционной среде. Показано, что при низких значениях плотности (от 0 до 0,05 молекул/м³) преобладают столкновения исходных реагентов со стенкой и активными центрами цеолита на поверхности. При увеличении объемной молекулярной плотности более чем на 15 % растет доля межмолекулярных столкновений реагирующих веществ. Выявлено, что увеличение молекулярной плотности заполнения каналов негативно влияет на скорость реакции исходных соединений и способствует накоплению полиароматических соединений из-за преимущественного вступления в реакцию пристеночного молекулярного слоя. Эти данные могут быть полезны для оптимизации условий проведения химических реакций с использованием цеолитов.

Ключевые слова: цеолиты, спирты, углеводороды, конфигурационная диффузия, диффузия Кнудсена, газовая диффузия, столкновение, объемная молекулярная плотность.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-68-80

ВВЕДЕНИЕ

Геометрические (длина, диаметр) и структурные (количество активных центров, электронное состояние) характеристики пор оказывают решающее влияние на диффузию реагирующих веществ и количество активных столкновений, что определяет селективность химических превращений, в том числе процессов трансформации спиртов в углеводороды. В настоящее время молекулярная диффузия в цеолитах рассмотрена в большом количестве работ, среди которых есть труды, посвященные гравиметрическому исследованию [4], методу калориметрического микробаланса [2], квазиупругому рассеянию нейтронов [1], хроматографическим методам исследования, ядерному магнитному резонансу [3] и математическому моделированию. Данные работы могут быть использованы при изучении диффузионных свойств цеолитов. Разветвленная структура пор цеолитов накладывает существенные ограничения на экспериментальное определение механизмов диффузии реагентов в порах и каналах цеолитов, в связи с чем теоретические методы и математическое моделирование становятся определяющими методами, способными пролить свет на диффузионные процессы в вышеуказанных материалах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Можно выделить три основные модели диффузионных процессов в пористых системах: конфигурационную диффузию, диффузию Кнудсена и газовую. Модель конфигурационной диффузии применяется при отношении диаметра канала к диаметру молекулы, близкому к единице. Модель газовой диффузии используется при высоких соотношениях диаметра канала и диаметра диффундирующих молекул, а диффузионная модель Кнудсена преимущественно применяется при меньших соотношениях диаметра поры и диаметра молекулы и более низких плотностях заполнения канала реагентами. Модель диффузии Кнудсена была экспериментально подтверждена для слабо адсорбированных частиц при их диффузии в мезопористых материалах, содержащих цилиндрические поры со средним диаметром 120 Å [5]. Проведенные исследования показали, что для более сильно адсорбированных частиц при диффузии в мелких порах силовые поля вблизи стенок пор вызывают уменьшение среднего пробега молекулы до соударения со стенкой, уменьшая таким образом эффективный коэффициент диффузии по сравнению с расчетным коэффициентом диффузии Кнудсена [6–8]; однако данное занижение коэффициентов диффузии Кнудсена не наблюдалось экспериментально в порах с диаметром 35 Å [9]. Это позволило [10, 11] провести количественную оценку Кнудсеновской и поверхностной диффузии в порах цеолита [12, 13].

Диффузия молекул в каналах цеолитов тесно связана с их траекториями передвижения и видами возникающих столкновений. Кнудсеновская диффузия в каналах цеолита изучалась с точки зрения исследования особенностей столкновений на основе методов Монте-Карло и различных теоретических моделей [14–16]. Однако моделирование процессов диффузии для оптимизации химических процессов должно основываться на теоретических положениях молекулярной диффузии и химических особенностях происходящих превращений, в связи с чем требуется теоретическое изучение диффузии основных участников процесса трансформации спиртов в углеводороды в порах цеолита.

Протекание реакции в одномерных каналах цеолитов может рассматриваться с позиции Кнудсеновской диффузии, газовой диффузии и конфигурационной диффузии. Граница между режимами диффузии определяется вероятностью бимолекулярного столкновения P_{bm} . При этом во время движения молекул в канале возможно столкновение их как со стенкой, так и с другими молекулами. Увеличение молекулярной плотности заполнения канала приводит к уменьшению вероятности столкновений молекул со стенками поры P_{mw} , а вероятность бимолекулярных столкновений P_{mm} увеличивается. При этом пристеночный молекулярный слой реагентов участвует в относительно одинаковом количестве как межмолекулярных столкновений, так и столкновений со стенкой поры.

При рассмотрении протекания химических реакций в каналах цеолитов можно выделить наличие следующих состояний системы:

1. Молекула сталкивается со стенкой канала, не адсорбируясь на ее поверхности.
2. Молекула сталкивается только со стенкой канала, адсорбируясь на ее поверхности.
3. Молекула сталкивается с адсорбированной на стенке канала молекулой с образованием переходного комплекса.
4. Происходит трансформация переходного комплекса с образованием новой молекулы.
5. Происходит протекание диффузии образовавшейся молекулы со стенки цеолита в поток реагентов.

6. Молекулы сталкиваются друг с другом в объеме канала цеолита.

7. Молекула реагирующего вещества ограничена стенкой.

В общем числе столкновений молекул со стенками C_{cm} можно выделить C_{A-cm} и C_{B-cm} . Вероятность бимолекулярного столкновения P_{mm} определяется по формуле

$$P_{mm} = C_{mm} / (C_{mm} + C_{cm}), \quad (1)$$

где C_{mm} – количество межмолекулярных столкновений; C_{cm} – количество столкновений со стенкой цеолита.

Вероятность столкновения молекулы со стенкой с образованием переходного комплекса $P_{ПК}$ возможно определить по уравнению

$$P_{ПК} = \frac{\gamma C_{cm}^2}{C_{mm} + C_{cm}}, \quad (2)$$

где γ – доля адсорбционных центров на поверхности канала цеолита.

При нахождении молекул реагирующего вещества в разных каналах цеолитов различаются объемные плотности заполнения каналов как из-за количества присутствующих в канале молекул, так и из-за разницы диаметров каналов. Необходимо рассчитывать молекулярную объемную плотность ρ_v для каждого случая отдельно по формуле

$$\rho_v = \frac{NV_m}{V_c}, \quad (3)$$

где N – общее количество молекул в канале; V_m – объем канала, занимаемого молекулами, м³; V_c – общий объем канала цеолита, м³.

Объем, занимаемый реагирующей молекулой V_m , может быть рассчитан по формуле

$$V_m = \frac{\pi d_m^3}{6}, \quad (4)$$

где d_m – диаметр молекулы, м

Объем канала можно найти по формуле

$$V_K = \frac{\pi d_K^2 L_K}{4}, \quad (5)$$

где d_K – диаметр канала, м; L_K – длина канала, м.

Распределение молекулярных скоростей устанавливается по формуле

$$f(u) = 4\pi u^2 \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{mu^2}{2kT}}, \quad (6)$$

где u – скорость реагирующей молекулы в канале цеолита, м/с; m – масса молекулы в канале цеолита, кг; k – постоянная Больцмана, $1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К; T – температура, К.

Средняя скорость реагирующей молекулы в канале цеолита рассчитывается по формуле

$$\bar{u} = \left(\frac{8kT}{\pi m} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

где m – масса реагирующей молекулы в канале цеолита, кг.

Скорость соударений молекул в канале цеолита со стенкой рассчитывается по формуле

$$Z_{cm} = \frac{\rho_n \bar{u}}{4}, \quad (8)$$

где ρ_n – объемная плотность заполнения каналов цеолита молекулами, молекул/м³; \bar{u} – средняя скорость молекул в канале цеолита, м/с.

Кроме того, концентрация молекул в единице объема канала цеолита может быть рассчитана по формуле

$$\rho_n = \frac{N}{V_k}, \quad (9)$$

где N – число молекул в канале цеолита; V_k – объем поры цеолита, м³.

При этом в канале цеолита скорость бимолекулярных столкновений вычисляется по формуле

$$Z_{mm} = \frac{\rho_n \pi d_m^2 \bar{u}}{\sqrt{2}}, \quad (10)$$

где ρ_n – концентрация молекул в единице объема канала цеолита, молекул/м³; \bar{u} – средняя скорость молекул в канале цеолита, м/с; d_m – диаметр молекулы, находящейся в канале цеолита, м.

Для расчета площади поверхности поры возможно использование формулы

$$A_n = \pi d_{поры} L_{поры}, \quad (11)$$

где $d_{поры}$ – диаметр поры цеолита, м; $L_{поры}$ – длина поры цеолита, м.

Расчет площади поверхности поры адсорбционных центров может быть произведен по формуле

$$A_n = \pi \gamma d_{поры} L_{поры}, \quad (12)$$

где γ – доля поверхности, занятой активными центрами в канале цеолита, %

При объединении уравнений (1)–(12) получаем новое уравнение для определения количества разных типов соударения. Число соударений в объеме канала цеолита возможно определить по формуле

$$C_{mm} = Z_{mm} V_c = \frac{\rho_n \pi d_m^2}{\sqrt{2}} \left(\frac{8 k T}{\pi m} \right)^{1/2} \frac{\pi d_k^2 L_k}{4}, \quad (13)$$

где ρ_n – концентрация молекул в единице объема канала цеолита, молекул/м³; d_m – диаметр молекул, находящихся в канале цеолита, м; m – масса молекул, находящихся в канале цеолита, кг; k – постоянная Больцмана, $1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К; T – температура, К; d_k – диаметр канала цеолита, м; L_k – длина канала цеолита, м.

Определение общего числа соударений реагирующих молекул о стенку канала производится по формуле

$$C_{mm} = Z_{m-ст} A_n = \frac{\rho_n}{4} \left(\frac{8 k T}{\pi m} \right)^{1/2} \pi d_{поры} L_{поры}, \quad (14)$$

где $Z_{m-ст}$ – скорость соударений молекул со стенкой цеолита; A_n – площадь поверхности поры цеолита; ρ_n – концентрация молекул в единице объема канала цеолита, молекул/м³.

Определение числа соударений молекул реагирующих веществ о поверхность активных центров, расположенных на стенках канала цеолита, производится по формуле

$$C_{мер} = Z_{m-ст} A_n \gamma = \frac{\rho_n}{4} \left(\frac{8 k T}{\pi m} \right)^{1/2} \pi d_{поры} L_{поры}, \quad (15)$$

где $Z_{m-ст}$ – скорость соударений молекул со стенкой каналов цеолитов; ρ_n – концентрация молекул в единице объема канала цеолита, молекул/м³; γ – доля поверхности канала, занятого активными центрами.

При этом доля активных центров на поверхности каналов может быть рассчитана по уравнению

$$\gamma = \frac{S_{y\phi,акт} C_{y\phi}}{S_{y\phi}}, \quad (16)$$

где $S_{y\phi,акт}$ – удельная площадь активного центра на поверхности цеолита, м²/моль; $C_{y\phi}$ – удельное количество активных центров на поверхности цеолита, моль/г; $S_{y\phi}$ – удельная площадь микропор цеолита.

Для определения соотношения числа соударений о стенку канала цеолита и межмолекулярных соударений можно воспользоваться формулой

$$\frac{C_{м-с}}{C_{м-м}} = \frac{d_m}{3\sqrt{2}d_k\rho_v}, \quad (17)$$

где d_m – диаметр молекулы, диффундирующей в поры, м; d_k – диаметр поры, м; ρ_v – молекулярная объемная плотность диффундирующей молекулы.

При этом соотношение числа соударений молекул с активными центрами, расположенными в каналах цеолита, можно вычислить по формуле

$$\frac{C_{м-ац}}{C_{м-м}} = \frac{\gamma d_m}{3\sqrt{2}d_k\rho_v}, \quad (18)$$

где d_m – диаметр молекулы, диффундирующей в порах цеолита, м; d_k – диаметр поры цеолита, м; ρ_v – молекулярная объемная плотность заполнения канала цеолита; γ – доля поверхности поры цеолита, занятой активными центрами.

Основные физико-химические характеристики цеолита H-ZSM-5 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические характеристики цеолита H-ZSM-5

Диаметр поры, Å	Средняя длина поры, Å	Объем канала поры, м ³	Концентрация активных центров, ммоль/г	Поверхностная плотность активных центров, %
7,5	103	$4,31 \times 10^{-27}$	1	1,61

Основные характеристики молекул, вступающих в реакцию трансформации спиртов в углеводороды, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики молекул, входящих в реакционный цикл процесса трансформации спиртов в углеводороды

Соединение	$d_{кин}, \text{нм}$	$V_{мол}$	Мг, г/моль	Соединение	$d_{кин}, \text{нм}$	$V_{мол}$	Мг, г/моль
1	2	3	4	5	6	7	8
CH ₃ OCH ₃	0,46	$5,1 \times 10^{-29}$	46	C ₆ H ₆	0,66	$1,5 \times 10^{-28}$	78
CH ₃ OH	0,39	$3,1 \times 10^{-29}$	32	C ₆ H ₅ CH ₃	0,69	$1,1 \times 10^{-28}$	92
C ₂ H ₅ OH	0,45	$3,3 \times 10^{-29}$	56	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	0,7	$1,3 \times 10^{-28}$	106
C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	0,58	$9,6 \times 10^{-29}$	74	C ₆ H ₃ (CH ₃) ₃	0,71	$1,35 \times 10^{-28}$	120
C ₃ H ₇ OH	0,47	$3,5 \times 10^{-29}$	60	C ₆ H ₂ (CH ₃) ₄	0,72	$1,38 \times 10^{-28}$	134

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
C ₄ H ₉ OH	0,49	$1,1 \times 10^{-28}$	74	C ₆ H(CH ₃) ₅	0,73	$1,4 \times 10^{-28}$	148
CH ₄	0,38	$2,9 \times 10^{-29}$	16	C ₆ (CH ₃) ₆	0,74	$1,5 \times 10^{-28}$	162
C ₂ H ₄	0,39	$3,1 \times 10^{-29}$	28	C ₆ H ₅ C ₂ H ₅	0,67	$1,2 \times 10^{-28}$	94
C ₃ H ₆	0,45	$4,8 \times 10^{-29}$	42	C ₆ H ₅ C ₃ H ₇	0,68	$1,4 \times 10^{-28}$	120
C ₄ H ₈	0,54	$8,2 \times 10^{-29}$	56	C ₆ H ₅ C ₄ H ₉	0,72	$2,2 \times 10^{-28}$	134
C ₅ H ₁₀	0,58	$1,0 \times 10^{-28}$	70	C ₁₀ H ₈	0,74	$3,0 \times 10^{-28}$	128
C ₆ H ₁₂	0,63	$1,3 \times 10^{-28}$	84	—	—	—	—

На основе вышеуказанных данных были рассчитаны соотношения количеств столкновений «молекула – молекула», «молекула – стенка», «молекула – активный центр» и приведены для диметилового эфира, метанола, диэтилового эфира, этанола, пропанола и бутанола (рис. 1). При объемной молекулярной плотности менее 0,05 молекул/м³ преобладают столкновения исходных реагентов с поверхностью цеолита и локализованными на ней активными центрами. Повышение объемной молекулярной плотности сверх указанного уровня увеличивает долю межмолекулярных столкновений реагирующих частиц. Вследствие этого в приграничном слое преимущественно реализуется взаимодействие молекул с поверхностью цеолита и его активными участками. Таким образом, рост объемной молекулярной плотности заполнения пор отрицательно сказывается на ускорении химической реакции исходных компонентов и одновременно способствует аккумуляции полиароматических соединений вследствие вовлечения в процесс реакций молекулярного слоя, прилегающего к стенкам.

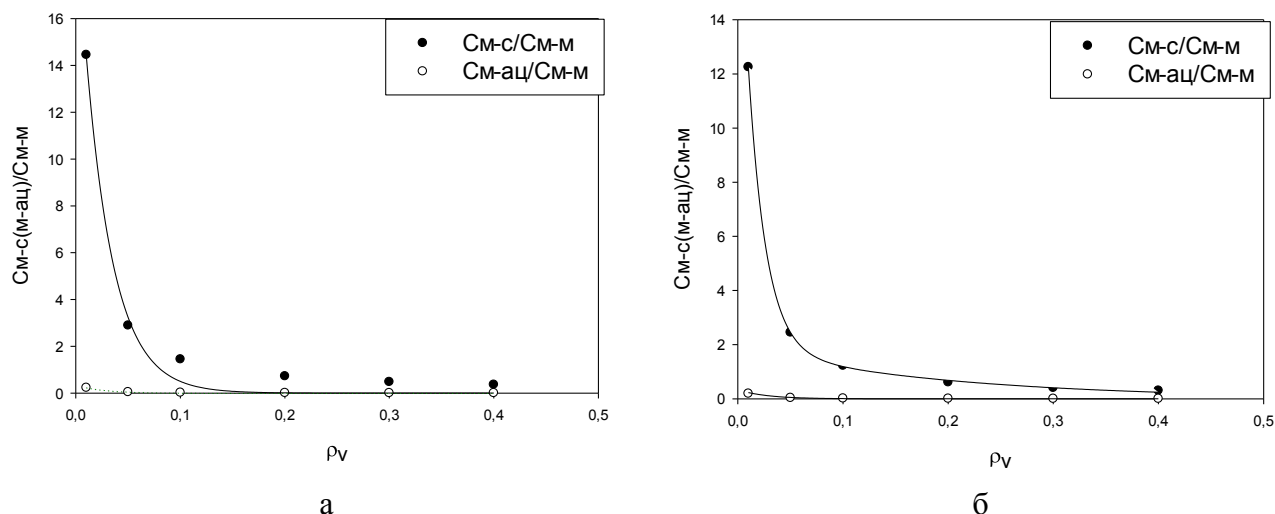


Рис. 1. Соотношения количества столкновений «молекула – молекула», «молекула – стенка», «молекула – активный центр»: а – для метанола; б – диметилового эфира; в – этанола; г – диэтилового эфира; д – пропанола; е – бутанола

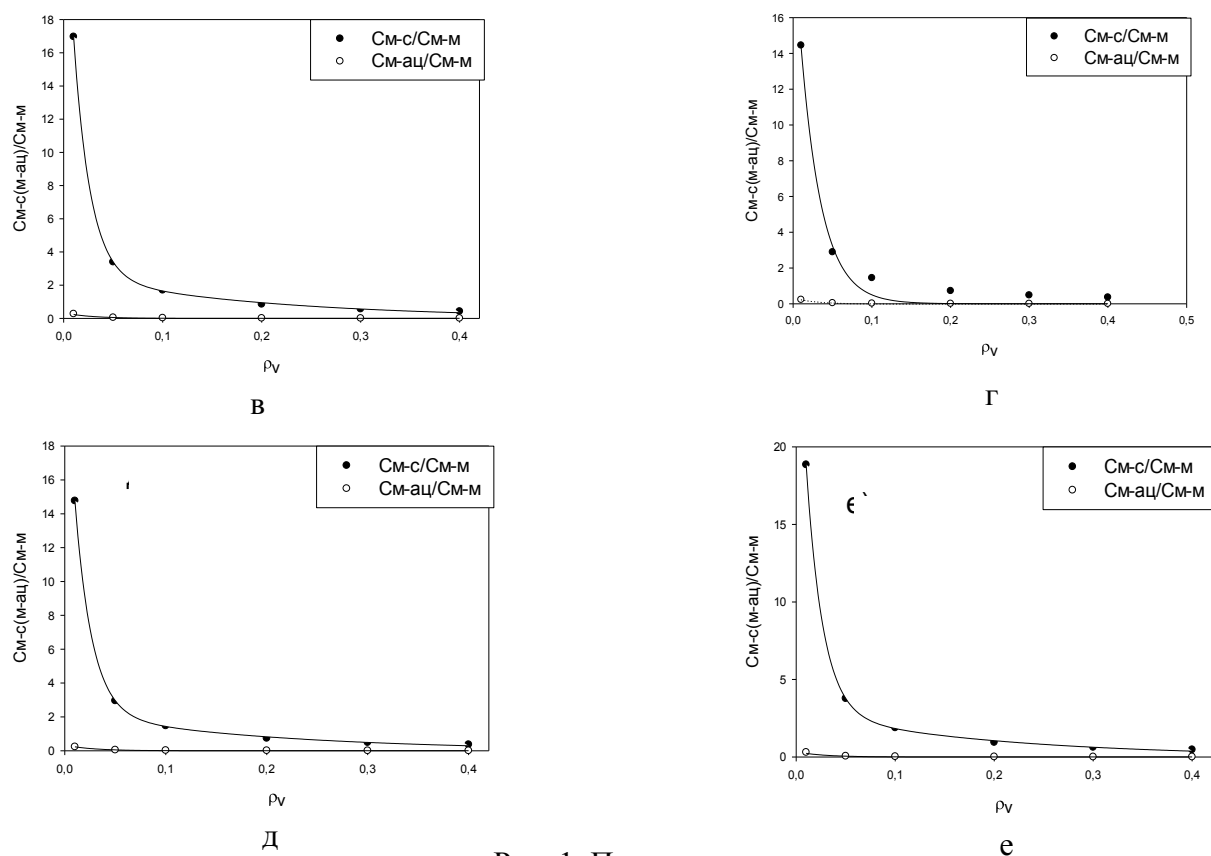


Рис. 1. Продолжение

Для насыщенных (метана) и ненасыщенных углеводородов (этилена, пропилена, бутена, пентена и гексена) наблюдается аналогичная картина (рис. 2). Преимущественное взаимодействие молекул со стенками цеолита происходит при объемных молекулярных плотностях заполнения поры менее $0,05$ молекул/ m^3 , что указывает на область оптимальных концентраций реагирующих веществ на поверхности цеолита.

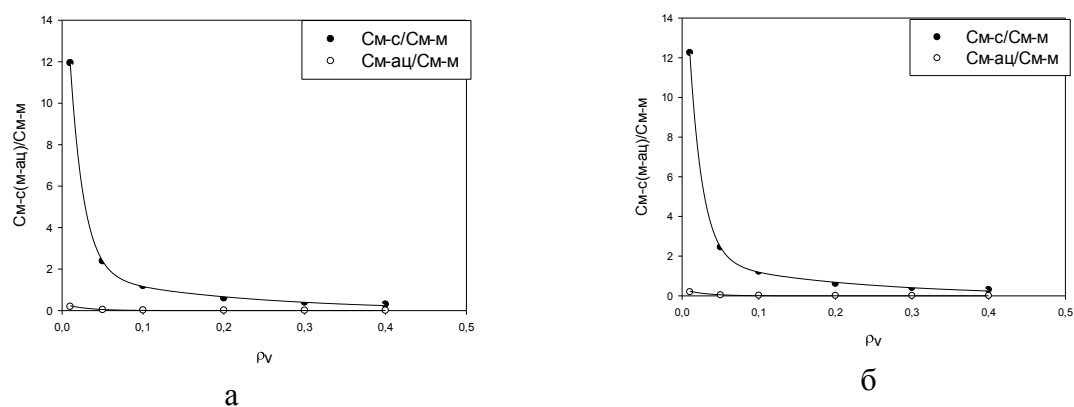


Рис. 2. Соотношения количества столкновений
«молекула – молекула», «молекула – стенка»,
«молекула – активный центр»: а – для метана; б – этилена;
в – пропена; г – бутена; д – пентена; е – гексена

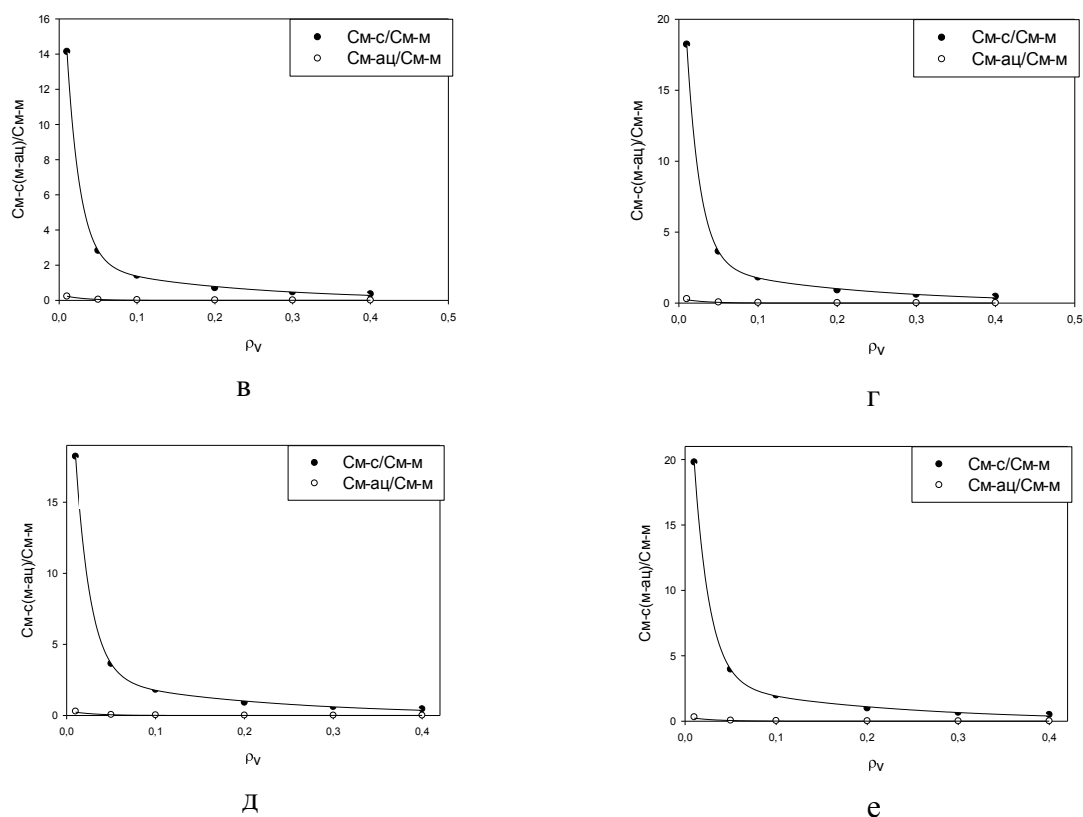


Рис. 2. Продолжение

Для ароматических соединений – бензола и его монозамещенных производных – при плотностях заполнения пор менее $0,05$ молекул/ м^3 наблюдается превышение числа соударений о стенку по сравнению с межмолекулярными соударениями (рис. 3). Переход от соударений молекул со стенками цеолита к межмолекулярным столкновениям происходит при объемных молекулярных плотностях заполнения больше $0,2$ молекул/ м^3 .

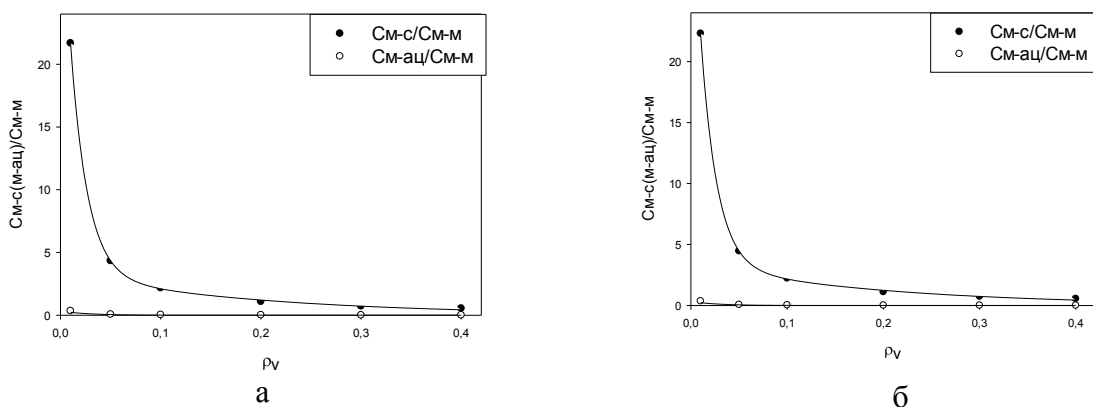


Рис. 3. Соотношения количества столкновений «молекула – молекула», «молекула – стенка», «молекула – активный центр»: а – для бензола; б – толуола; в – этилбензола; г – пропилбензола; д – бутилбензола; е – ксилола

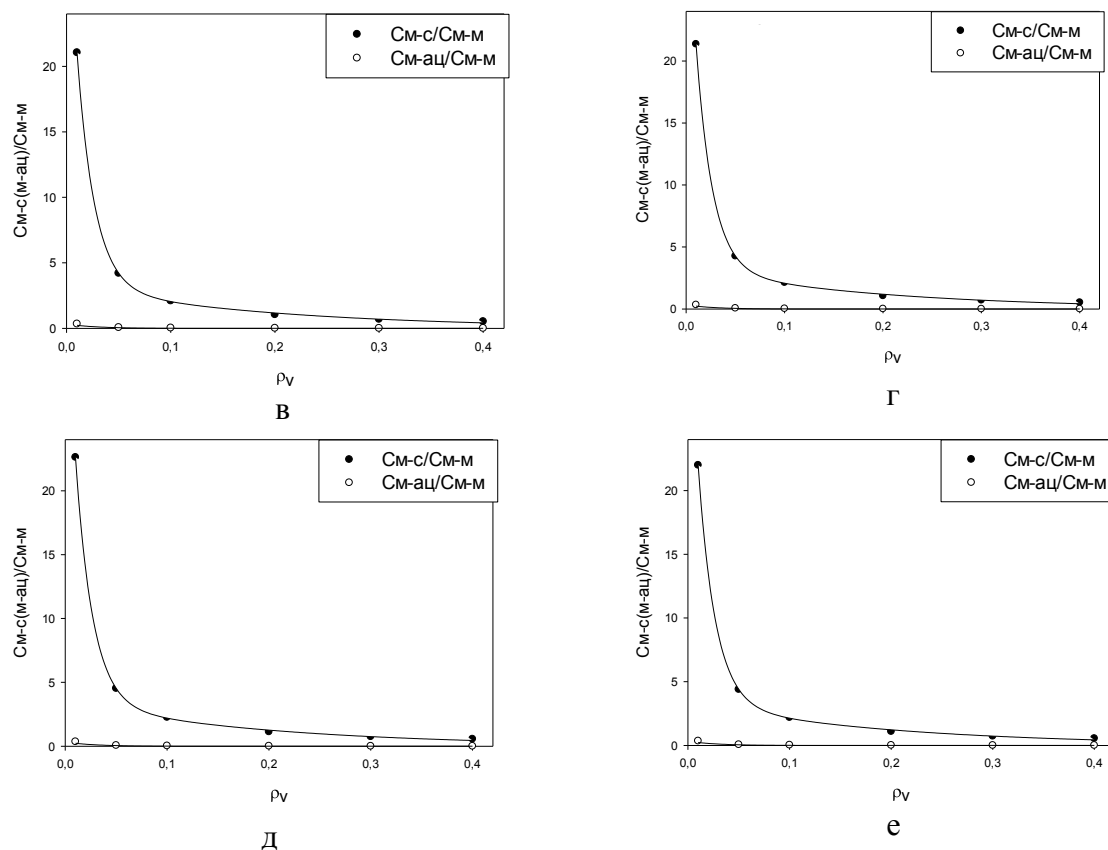


Рис. 3. Продолжение

Полизамещенные производные бензола и нафталина также показывают превышение числа соударений о стенку по сравнению с межмолекулярными соударениями при значениях объемных плотностей реагентов меньше $0,5$ молекул/ м^3 (рис. 4). Переход от соударений молекул со стенками цеолита к межмолекулярным столкновениям наблюдается при объемных молекулярных плотностях заполнения поры больше $0,2$ молекул/ м^3 .

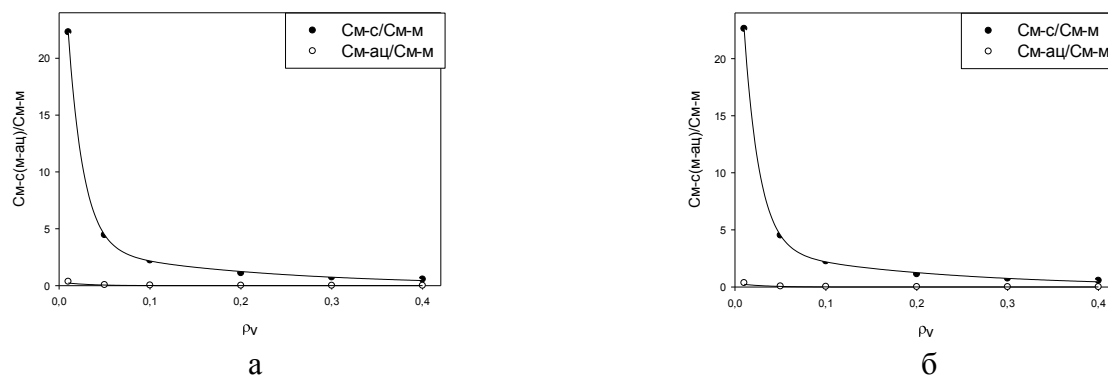


Рис. 4. Соотношения количества столкновений «молекула – молекула», «молекула – стенка», «молекула – активный центр»: а – для триметилбензола; б – тетраметилбензола; в – пентаметилбензола; г – гексаметилбензола; д – нафталина

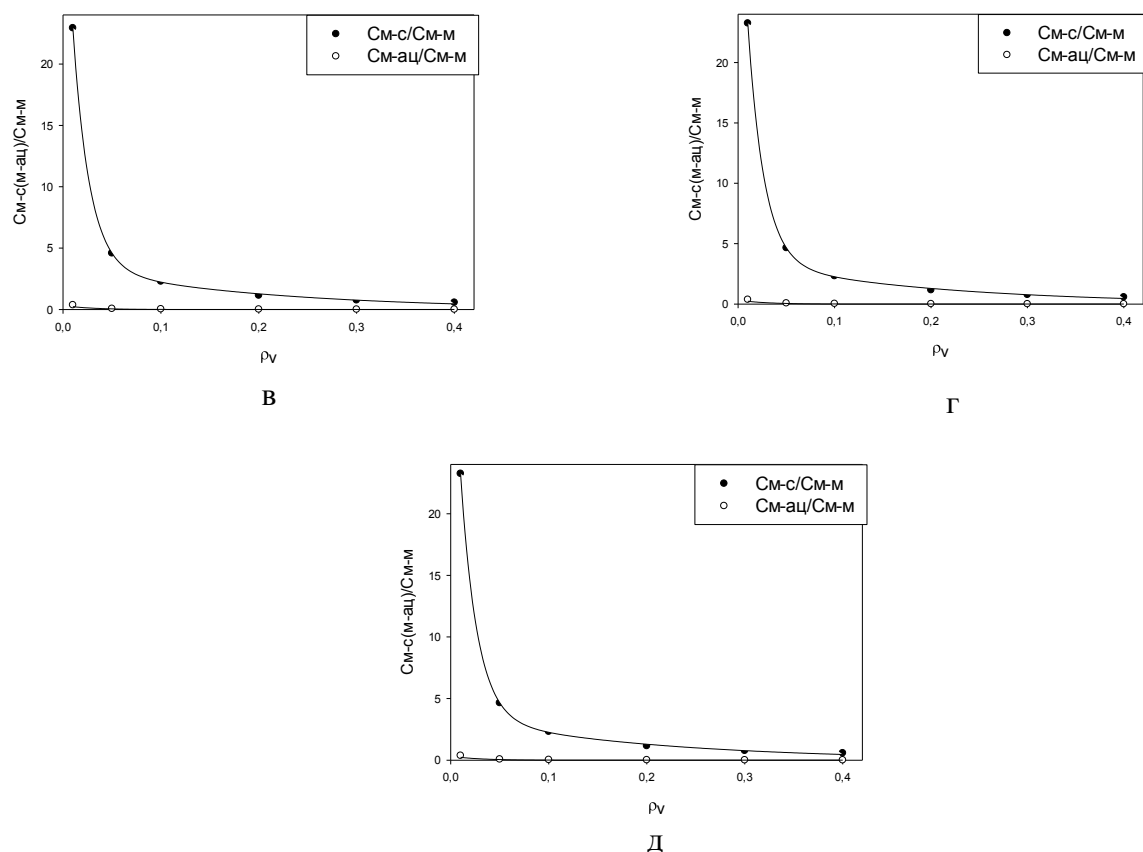


Рис. 4. Продолжение

Для рассчитанных соединений наблюдается схожая зависимость столкновений молекулы о поверхность от межмолекулярных столкновений. В диапазоне молекулярных плотностей заполнения от 0 до 5 % наблюдается превалирование соударений о стенку цеолита и его активные центры, при плотностях заполнения от 5 до 20 % наблюдается переходной режим протекания процесса, а при плотности заполнения каналов выше 20 % преваляют межмолекулярные столкновения. При этом для преимущественного образования жидких углеводородов фракции бензола, толуола, этилбензола, пропилбензола, бутилбензола, ксилолов необходимо проводить процесс в области Кнудсеновской диффузии, что также положительным образом скажется на замедлении образования полиметилбензолов и полиароматических соединений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные расчеты соотношения количества столкновений «молекула – молекула», «молекула – стенка», «молекула – активный центр» показали, что при значениях объемной молекулярной плотности от 0 до 0,05 молекул/м³ преваляют соударения исходных реагентов со стенкой и с активными центрами цеолита, расположенными на его поверхности. Увеличение объемной молекулярной плотности более 15 % способствует росту доли межмолекулярных соударений реагирующих веществ. При этом в пристеночном слое реагирующих соединений начнет происходить преимущественное взаимодействие молекул со стенкой цеолита и с активными центрами.

Таким образом, увеличение объемной молекулярной плотности заполнения каналов оказывает отрицательное влияние на увеличение скорости реакции исходных соединений, а кроме того, увеличение молекулярной плотности заполнения каналов будет способствовать накоплению полиароматических соединений в результате преимущественного вступления в реакцию пристеночного молекулярного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kolokathis P.D., Kali G., Jobic H., Theodorou D.N. Diffusion of Aromatics in Silicalite-1: Experimental and Theoretical Evidence of Entropic Barriers // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2016. Vol. 120. No. 38, pp. 21410–21426.
2. Zhu W., Kapteijn F., Moulijn J. A. Diffusion of Linear and Branched C6 Alkanes in Silicalite-1 Studied by the Tapered Element Oscillating Microbalance // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2001. Vol. 47. No. 2, pp. 157–171.
3. Mehlhorn D., Valiullin R., Kärger J., Cho K., Ryoo R. Exploring Mass Transfer in Mesoporous Zeolites by NMR Diffusometry // *Materials*. 2012. Vol. 5. No. 4, pp. 699–720.
4. Liu Z., Fan W., Ma J., Li R. Adsorption, Diffusion and Catalysis of Mesostructured Zeolite HZSM-5 // *Adsorption*. 2012. Vol. 18. No. 5, pp. 493–501.
5. Gruener S., Huber P. Knudsen Diffusion in Silicon Nanochannels // *Physical Review Letters*. 2008. Vol. 100. No. 6, pp. 064502.
6. Bhatia S.K., Nicholson D. Some Pitfalls in the Use of the Knudsen Equation in Modelling Diffusion in Nanoporous Materials // *Chemical Engineering Science*. 2011. Vol. 66. No. 3, pp. 284–293.
7. Krishna R., van Baten J.M. An Investigation of the Characteristics of Maxwell – Stefan Diffusivities of Binary Mixtures in Silica Nanopores // *Chemical Engineering Science*. 2009. Vol. 64. No. 5, pp. 870–882.
8. Bhatia S.K., Jepps O., Nicholson D. Tractable Molecular Theory of Transport of Lennard – Jones Fluids in Nanopores // *The Journal of Chemical Physics*. 2004. Vol. 120. No. 9, pp. 4472–4485.
9. Reyes S.C., Sinfelt J.H., DeMartin G.J., Ernst R.H. Frequency Modulation Methods for Diffusion and Adsorption Measurements in Porous Solids // *The Journal of Physical Chemistry B*. 1997. Vol. 101. No. 4, pp. 614–622.
10. Caravella A., Zito P.F., Brunetti A., Barbieri G., Drioli E. Evaluation of Pure-component Adsorption Properties of Silicalite Based on the Langmuir and Sips Models // *AIChE Journal*. 2015. Vol. 61. No. 11, pp. 3911–3922.
11. Zito P.F., Caravella A., Brunetti A., Drioli E., Barbieri G. Estimation of Langmuir and Sips Models Adsorption Parameters for NaX and NaY FAU Zeolites // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2015. Vol. 60. No. 10, pp. 2858–2868.
12. Caravella A., Zito P.F., Brunetti A., Drioli E., Barbieri G. A Novel Modelling Approach to Surface and Knudsen Multicomponent Diffusion through NaY Zeolite Membranes // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2016. Vol. 235, pp. 87–99.
13. Zito P.F., Caravella A., Brunetti A., Drioli E., Barbieri G. Knudsen and Surface Diffusion Competing for Gas Permeation inside Silicalite Membranes // *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 523, pp. 456–469.
14. Xiao J., Wei J. Diffusion Mechanism of Hydrocarbons in Zeolites – I. Theory // *Chemical Engineering Science*. 1992. Vol. 47. No. 5, pp. 1123–1141.

15. Liu J., Wei J. Knudsen Diffusion in Channels and Networks // *Chemical Engineering Science*. 2014. Vol. 111, pp. 1–14.
16. Rungsirisakun R., Nanok T., Probst M., Limtrakul J. Adsorption and Diffusion of Benzene in the Nanoporous Catalysts FAU, ZSM-5 and MCM-22: A Molecular Dynamics Study // *Journal of Molecular Graphics and Modelling*. 2006. Vol. 24. No. 5, pp. 373–382.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУРАГИН Алексей Андреевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: xt-337@mail.ru

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

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

СУЛЬМАН Михаил Геннадьевич – доктор 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: xt-337@mail.ru

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Курагин А.А., Пичугина А.И., Лакина Н.В., Сульман М.Г., Долуда В.Ю. Определение вероятности столкновений реагирующих молекул в одномерном канале цеолита H-ZSM-5 для процесса трансформации спиртов в углеводороды // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 3 (27). С. 68–80.

DETERMINATION OF THE PROBABILITY OF COLLISIONS OF REACTING MOLECULES IN THE ONE-DIMENSIONAL CHANNEL OF ZEOLITE H-ZSM-5 FOR THE PROCESS OF ALCOHOLS TRANSFORMATION INTO HYDROCARBONS

A.A. Kuragin, A.I. Pichugina, N.V. Lakina, M.G. Sulman, V.Yu. Doluda
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The results of calculations demonstrating the relationship between the bulk molecular density and the ratio of different types of collisions of molecules in a reaction medium are presented. It is shown that at low densities (from 0 to 0,05 molecules/m³) collisions of the initial reagents with the wall and active zeolite centers on the surface prevail. With an increase in the volumetric molecular density by more than 15 %, the proportion of intermolecular collisions of reacting substances increases. It was revealed that an increase in the molecular density of channel filling negatively affects the reaction rate of the initial compounds and contributes to the

accumulation of polyaromatic compounds due to the predominant reaction of the wall molecular layer. These data can be useful for optimizing the conditions of chemical reactions using zeolites.

Keywords: zeolites, alcohols, hydrocarbons, configuration diffusion, Knudsen diffusion, gas diffusion, collision, bulk molecular density.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KURAGIN Alexey Andreevich – Postgraduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: xt-337@mail.ru

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

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

SULMAN Mikhail Gennadievich – Doctor 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: xt-337@mail.ru

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Kuragin A.A., Pichugina A.I., Lakina N.V., Sulman M.G., Doluda V.Yu. Determination of the probability of collisions of reacting molecules in the one-dimensional channel of zeolite H-ZSM-5 for the process of alcohols transformation into hydrocarbons // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 3 (27), pp. 68–80.

УДК 544.773.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СМЕСИ ВОДОРОДА И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ ФОРМАЛЬДЕГИДА И ЕГО ПРОИЗВОДНЫХ

*А.А. Курагин, А.И. Пичугина, Н.Ю. Старовойтова, А.В. Старовойтов,
К.В. Чалов, А.В. Устимов, В.Ю. Долуда*
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Курагин А.А., Пичугина А.И., Старовойтова Н.Ю.,
Старовойтов А.В., Чалов К.В., Устимов А.В., Долуда В.Ю., 2025

Аннотация. Определение метрологических характеристик химических и физико-химических аналитических процедур является основополагающей задачей современной аналитической химии. Чувствительность, минимально определяемые концентрации,

ошибка и воспроизводимость выполняемых измерений выступают основными метрологическими показателями. При этом установление точного состава сложных, многокомпонентных смесей само по себе является неординарной аналитической задачей, зачастую требующей использования различных аналитических процедур и техники. Определение веществ, существенно отличающихся друг от друга по химическим и физическим свойствам, в рамках одной аналитической процедуры считается сложной научно-технической задачей. В настоящее время для определения легких газов – водорода, метана, углекислого газа и монооксида углерода – используются хроматографические методы, инфракрасная спектроскопия, электрохимические датчики, адсорбционные и волюмометрические методы, хромато-масс-спектроскопия. При этом только хроматографические методы анализа обеспечивают приемлемую чувствительность при совместном детектировании диоксида углерода и водорода. В статье приведены результаты установления калибровочных зависимостей, используемых для одновременного определения водорода и углекислого газа хроматографическим методом с детектированием по теплопроводности газов. Разделение производилось на двух параллельных насадочных колонках длиной 5 м и внутренним диаметром 2 мм, а в качестве газов-носителей использовались гелий и аргон. Получены данные о наименьших определяемых концентрациях, ошибках определения концентраций, чувствительности используемого метода. Показана возможность линейного детектирования водорода и диоксида углерода с использованием детектора по теплопроводности.

Ключевые слова: диоксид углерода, водород, хроматография, анализ, условия анализа, температура, ошибка анализа.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-80-86

ВВЕДЕНИЕ

Определение содержания водорода и диоксида углерода в технологических и лабораторных газовых смесях является важной научно-технической задачей, решение которой возможно различными аналитическими методами [1]. Содержание водорода и диоксида углерода может быть определено волюмометрическими методами, адсорбционными, электрохимическими, инфракрасной спектроскопией, масс-спектрометрией, а также газохроматографическим методом [2]. При этом для детектирования водорода и диоксида углерода возможно использование детектора по теплопроводности, масс-спектрометра или пламенно-ионизационного детектора с предварительным метанированием диоксида углерода до метана [3, 4]. Детектирование по теплопроводности газов приемлемо в плане стоимости детектора, в то время как масс-спектрометрическое детектирование выступает крайне дорогостоящим способом определения концентраций газов [5, 6]. Однако для обеспечения максимальной чувствительности детектора по теплопроводности в случае определения водорода требуется использование аргона в качестве газа-носителя, а при определении диоксида углерода предпочтительно применение гелия. Таким образом, требуется разработка комбинированной схемы совместного анализа водорода и диоксида углерода, а также определение метрологических характеристик анализа.

МЕТОДЫ, МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ

Для проведения калибровки использовали газообразный водород и диоксид углерода, которые дозировались через соответствующую систему напуска. Анализ газовой фазы проводился с применением хроматографа «Кристаллюкс-4000М», снабженного двумя насадочными колонками длиной 5 м и внутренним диаметром 2 мм, заполненными

сорбентом MN-270 фракцией 70–120 мкм. Температура термостата колонки составляла 40 °С, а линейная скорость потока газа-носителя аргона для анализа водорода, а также газа-носителя гелия для анализа всех газов поддерживалась постоянной – 0,32 см/мин, время анализа при этом составляло 7 мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Полученная зависимость сигнала детектора по теплопроводности от количества детектируемого водорода приведена на рис. 1. Она показывает наличие области нелинейной зависимости при количестве анализируемого водорода более 110 мкг. Соответственно, область уверенного линейного детектирования составляет 14–100 мкг, в связи с чем необходимо соответствие количества вводимой пробы линейному интервалу.

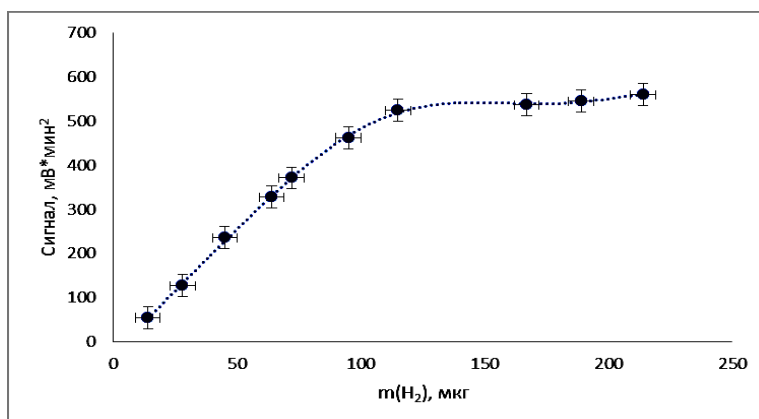


Рис. 1. Зависимость сигнала детектора по теплопроводности от различного количества вводимого водорода
($t_{\text{детектора}} = 120$ °С, газ-носитель – аргон, линейная скорость газа – 0,31 см/мин)

В калибруемом диапазоне (рис. 2) коэффициент корреляции составляет 0,994, а минимально определяемая концентрация – 9,5 мкг водорода.

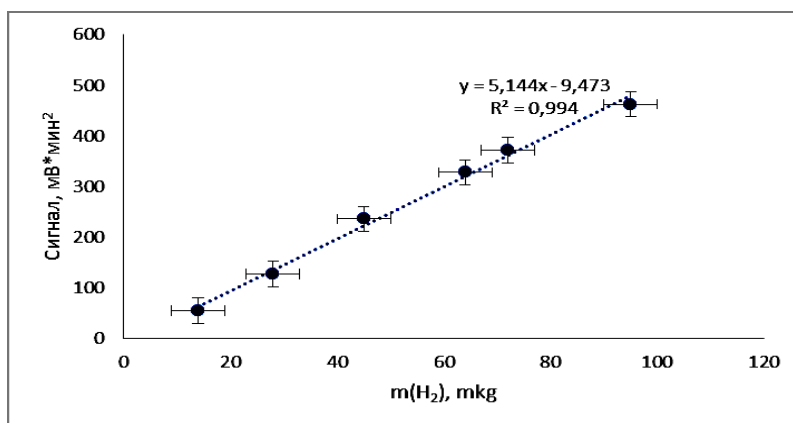


Рис. 2. Зависимость сигнала детектора по теплопроводности от количества водорода в линейно калибруемом диапазоне
($t_{\text{детектора}} = 120$ °С, газ-носитель – аргон, линейная скорость газа – 0,31 см/мин)

Случайная ошибка определения концентраций с учетом 95%-й заданной вероятности при пятикратном измерении хроматографического сигнала может быть определена по формуле

$$\Delta m_{сл} = 2,8 \sqrt{\frac{(m_1 - \tilde{m}_{ср})^2 + (m_2 - \tilde{m}_{ср})^2 + (m_2 - \tilde{m}_{ср})^2 + (m_2 - \tilde{m}_{ср})^2 + (m_2 - \tilde{m}_{ср})^2}{20}}. \quad (1)$$

Приборная погрешность хроматографа при измерении массы водорода равна половине минимально детектируемой массы и составляет 4,24 мг детектируемого водорода. Таким образом, полную погрешность измерения массы вводимого водорода можно определить по формуле

$$\Delta m_{полн} = \sqrt{\Delta m_{сл}^2 + \Delta m_{хром}^2}. \quad (2)$$

Полученная зависимость сигнала детектора по теплопроводности от количества детектируемого диоксида углерода приведена на рис. 3.

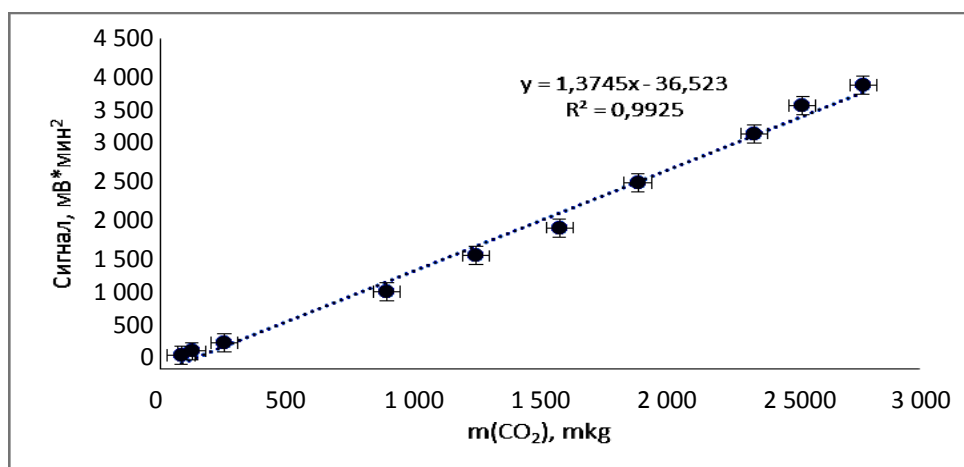


Рис. 3. Зависимость сигнала детектора по теплопроводности от различного количества вводимого диоксида углерода
($t_{детектора} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$, газ-носитель – гелий, линейная скорость газа – 0,31 см/мин)

Зависимость отклика детектора от различного количества вводимого диоксида углерода показывает широкий диапазон возможной линейной калибровки: от 84 до 3 000 мкг. Коэффициент корреляции при этом составляет 0,993, а минимально определяемая концентрация диоксида углерода – 36,5 мкг. При этом случайная ошибка определения концентраций с учетом 95%-й заданной вероятности при пятикратном измерении хроматографического сигнала может быть также определена по формуле (1). Приборная погрешность хроматографа при измерении массы диоксида углерода равна половине минимально детектируемой массы и составляет 18,25 мг детектируемого диоксида углерода. Полную погрешность измерения массы вводимого диоксида углерода можно определить по формуле (2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены калибровочные зависимости детектирования водорода и диоксида углерода детектором от теплопроводности, позволяющие проводить измерение их количества в диапазонах 14–100 мкг для водорода с наименьшей определяемой

концентрацией, равной 9,5 мкг, и 84–3 000 мкг для диоксида углерода с наименьшей определяемой концентрацией, равной 36,5 мкг. Случайная погрешность проводимых измерений может быть определена с учетом коэффициента Стьюдента при количестве проводимых измерений более 5, а приборная погрешность хроматографа при измерении массы детектируемых газов может быть равна половине минимально детектируемой массы анализируемого газа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования проведены в рамках выполнения Тверским государственным техническим университетом работ по проекту РНФ № 25-23-00333.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yan X., Yin Z., Xu Y., Xie H. A Dual-mode Electrochemical and Electrochemiluminescent Sensor Based on Hydrogen-bonded Organic Frameworks for Highly Sensitive Detection of Mercury and Zinc Ions // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2025. P. 431–439.
2. Mofidi M., Hudson M.K., Sievers R.E., Bartle K.D. Flame Infrared Emission Detection of Hydrogen // *Journal of Chromatography A*. 1992. Vol. 589. No. 1–2. P. 241–248.
3. Mori M., Ikeda M., Hu W., Helaleh M.I., Xu Q., Itabashi H., Tanaka K. High-speed Ion-exclusion Chromatography of Dissolved Carbon Dioxide on a Small Weakly Acidic Cation-exchange Resin Column with Ion-exchange Enhancement Columns of Conductivity Detection // *Journal of Chromatography A*. 2005. Vol. 1092. No. 2. P. 250–253.
4. Herrán J., Fernández-González O., Castro-Hurtado I., Romero T., Castaño E. Photoactivated Solid-state Gas Sensor for Carbon Dioxide Detection at Room Temperature // *Sensors and Actuator B: Chemical*. 2010. Vol. 149. No. 2. P. 368–372.
5. Martan T., Mareš D., Prajzler V. Local Detection of Gaseous Carbon Dioxide Using Optical Fibers and Fiber Tapers of Single-cell Dimensions // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2023. P. 375–383.
6. Li X., Jiang Y., Huang N., Liu J., Ma Y., Zhuang J., Zheng Y. Catalytic IR Thermal Imaging-based Hydrogen Detection // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2025. P. 427–438.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУРАГИН Алексей Андреевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: xt-337@mail.ru

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

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

СТАРОВОЙТОВ Анатолий Владимирович – старший преподаватель кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: avstarovoytov7@yandex.ru

ЧАЛОВ Кирилл Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tschalov_k@mail.ru

УСТИМОВ Александр Владимирович – кандидат химических наук, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: xt-337@mail.ru

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Курагин А.А., Пичугина А.И., Старовойтова Н.Ю., Старовойтов А.В., Чалов К.В., Устимов А.В., Долуда В.Ю. Определение метрологических характеристик хроматографического анализа смеси водорода и углекислого газа в процессе получения формальдегида и его производных // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 3 (27). С. 80–86.

DETERMINATION OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF CHROMATOGRAPHIC ANALYSIS OF A MIXTURE OF HYDROGEN AND CARBON DIOXIDE IN THE PROCESS OF OBTAINING FORMALDEHYDE AND ITS DERIVATIVES

*A.A. Kuragin, A.I. Pichugina, N.Yu. Starovoytova, A.V. Starovoytov,
K.V. Chalov, A.V. Ustimov, V.Yu. Doluda
Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. Determining the metrological characteristics of chemical and physicochemical analytical procedures is a fundamental task in modern analytical chemistry. Sensitivity, minimum detectable concentrations, measurement error, and reproducibility are key metrological indicators. Determining the precise composition of complex, multicomponent mixtures is a unique analytical challenge in itself, often requiring the use of various analytical procedures and equipment. Determining substances with significantly different chemical and physical properties within a single analytical procedure is considered a complex scientific and technical challenge. Currently, chromatographic methods, infrared spectroscopy, electrochemical sensors, adsorption and volumetric methods, and chromatograph mass spectroscopy are used to determine light gases – hydrogen, methane, carbon dioxide, and carbon monoxide. Only chromatographic methods of analysis provide acceptable sensitivity for the combined detection of carbon dioxide and hydrogen. This article presents the results of determining calibration curves used for the simultaneous determination of hydrogen and carbon dioxide using a chromatographic method with thermal conductivity detection. Separation is performed on two parallel packed columns, each 5 m long and 2 mm in internal diameter, using helium and argon as carrier gases. Data on the lowest detectable concentrations, determination errors, and sensitivity of the method are obtained. The feasibility of linear detection of hydrogen and carbon dioxide using a thermal conductivity detector is demonstrated.

Keywords: carbon dioxide, hydrogen, chromatography, analysis, analysis conditions, temperature, analysis error.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KURAGIN Alexey Andreevich – Postgraduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: xt-337@mail.ru

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

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

STAROVOYTOV Anatoly Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: avstarovoytov7@yandex.ru

CHALOV Kirill Vyacheslavovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tschalov_k@mail.ru

USTIMOV Aleksandr Vladimirovich – Candidate of Chemical Sciences, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: xt-337@mail.ru

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Kuragin A.A., Pichugina A.I., Starovoytova N.Yu., Starovoytov A.V., Chalov K.V., Ustimov A.V., Doluda V.Yu. Determination of metrological characteristics of chromatographic analysis of a mixture of hydrogen and carbon dioxide in the process of obtaining formaldehyde and its derivatives // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 3 (27), pp. 80–86.

УДК 661.123**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ МЕТОДОВ
КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПОЛИФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ФИТОСБОРАХ**

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. В работе проведено количественное определение полифенольных соединений в фиточаях «Фиточай № 39», «Фитосбор № 1» и «Опалиховский». Отмечено, что наибольшее количество полифенольных соединений содержится в водном извлечении фиточая «Фиточай № 39» (26,57 %), наименьшее – в спиртовом извлечении этого же фиточая (3,94 %) в пересчете на катехин. Спектрофотометрический метод анализа

полифенольных соединений в пересчете на галловую кислоту и танин сочтен оптимальным для количественного определения суммарного количества полифенольных соединений.

Ключевые слова: полифенольные соединения, галловая кислота, танин, фитосбор, лекарственное растительное сырье.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-86-95

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве лекарственного сырья широко используют растения. Значительный интерес представляют природные полифенольные соединения (флавоноиды и их гликозиды, фенолкарбоновые кислоты, кумарины, дубильные вещества и др.), обуславливающие биологическую активность такого сырья. Их состав и количественное содержание определяются ареалом произрастания растения и могут иметь общие черты у растений одного рода.

Полифенольные соединения широко известны благодаря своей антиоксидантной активности. Согласно общепринятой точке зрения, их антиоксидантные свойства основаны на способности соединений служить ловушками для свободных радикалов, а также хелатировать ионы металлов, участвующих в перекисном окислении. Фенольные соединения могут взаимодействовать с гидроксильными и пероксильными радикалами липидов (алкоксилами) благодаря их способности отдавать электрон (или атом) водорода. В результате образуются радикалы фенолов – феноксилы, которые не участвуют в распространении окислительного процесса. Это связано с уникальной структурой их молекул, в которой происходит делокализация неспаренного электрона, что приводит к стабилизации свободных радикалов.

Во всем мире активно исследуют действие богатых полифенольными соединениями растительных экстрактов. На их основе возможно создание новых высокоактивных лекарственных препаратов, обладающих противовоспалительной, противовирусной, антиканцерогенной, антипаразитарной или бактерицидной активностью. Благодаря способности полифенолов (ПФ) подавлять работу механизмов множественной лекарственной устойчивости ученые создают и испытывают новые антибиотики, а также агенты, вызывающие усиление действия других лекарств. В связи с перспективами использования полифенольных соединений в медицине в настоящее время наблюдается значительный рост интереса к их изучению. За последние три десятилетия число исследований в этой области составило от 8 000 до 10 000 публикаций в год (по данным PubMed) [2].

Объектом настоящего исследования являются такие фиточаи, как «Фиточай № 39» (в состав входят шиповник, эхинацея, девясил, липа, мята, ромашка, корень солодки, стевия, шалфей, душица, эвкалипт, чабрец); «Фитосбор № 1», (толокнянка, календула, укроп, элеутерококк, мята); «Опалиховский» (зверобой, липа, ромашка, мята, душица, шалфей, тимьян).

Полифенолы – разнообразные и широко распространенные минорные биологически активные соединения растительного происхождения. Они содержатся в различных пищевых продуктах: фруктах, овощах, крупах, орехах, кофе, какао, специях, семечках. В зависимости от строения молекулы выделяют фенольные кислоты, стильбены, флавоноиды, лигнаны, дубильные вещества. Полифенолы привлекают внимание

исследователей в связи с широким набором биологических эффектов, оказываемых на организм человека [3].

В научной литературе можно встретить различные варианты классификации ПФ. Общепринято выделение следующих групп:

1. Фенольные кислоты. Это ароматические кислоты, содержащие фенольное кольцо и карбоксильную функциональную группу. Они содержатся в тканях растений, чаще в связанной с сахарами или другими ПФ форме (рябина черноплодная, боярышник кроваво-красный, кора дуба и др.). В организме человека они образуются в результате микробного расщепления в толстой кишке либо при внутриклеточном метаболизме более конденсированных молекул [4].

2. Производные гидроксикоричной и гидроксibenзойной кислот. Это две основные группы фенольных кислот, выделяемые в зависимости от строения молекул. Наибольший интерес исследователей привлекают галловая, эллаговая, кофейная кислоты и производные последней: хлорогеновая, неохлорогеновая, розмариновая кислоты и др.

3. Флавоноиды. Это группа ПФ, участвующих во многих процессах, протекающих в организме. Они оказывают антиоксидантное действие, снижают свертываемость крови, уменьшают ломкость и проницаемость капилляров, улучшают обменные процессы [6]. Наиболее распространены и изучены представители флавонолов – кверцетин и кемпферол. Они содержатся в овощах, фруктах и зерновых культурах [5].

4. Дубильные вещества. Это группа растительных ПФ, способных «дубить» невыделанную шкуру, превращая ее в кожу. Эта способность дубильных веществ основана на их взаимодействии с белком кожных покровов – коллагеном, приводящим к образованию структур, устойчивых к процессам гниения. Однако не все такие вещества способны к дублению. Этим свойством обладают только природные высокополимерные соединения, имеющие молекулярную массу 1 000–5 000; более низкомолекулярные соединения имеют только вяжущий вкус и неспособны к дублению. Чтобы не путать такие вещества с подлинными дубителями, их часто называют «пищевыми танинами», «чайными танинами» [7].

Фиточаи (лат. *phyton* – растение) – чайные напитки из растений, которые широко используются в качестве продуктов питания, а также обладают не только органолептическими, но и целебными свойствами (в зависимости от состава растительной композиции) [8]. В настоящее время на фармацевтическом рынке имеется довольно широкий выбор фиточаев, но ежегодно появляются новые. Необходимо отметить, что в композиции фиточаев включают как культивируемые, так и дикорастущие растения [9]. Каждая композиция фиточая, которая появляется на рынке, отличается от предыдущих видовым составом растительных компонентов. Все фиточаи можно разделить на моноосновные и поликомпонентные. В настоящее время редко используют моноосновные чаи и даже 2–3-компонентные системы применяются не так часто. Таким образом, если напиток включает только один вид растительного сырья, то можно предположить, что оно было подвергнуто обработке, которая позволяет получить дополнительный выход биологически активных веществ. Так, в исследовательской работе [9] представлен способ производства чая, заключающийся в дополнительной ферментации сырья, которую осуществляют импульсным электрическим полем.

На рис. 1 представлена схема классификации фиточаев.

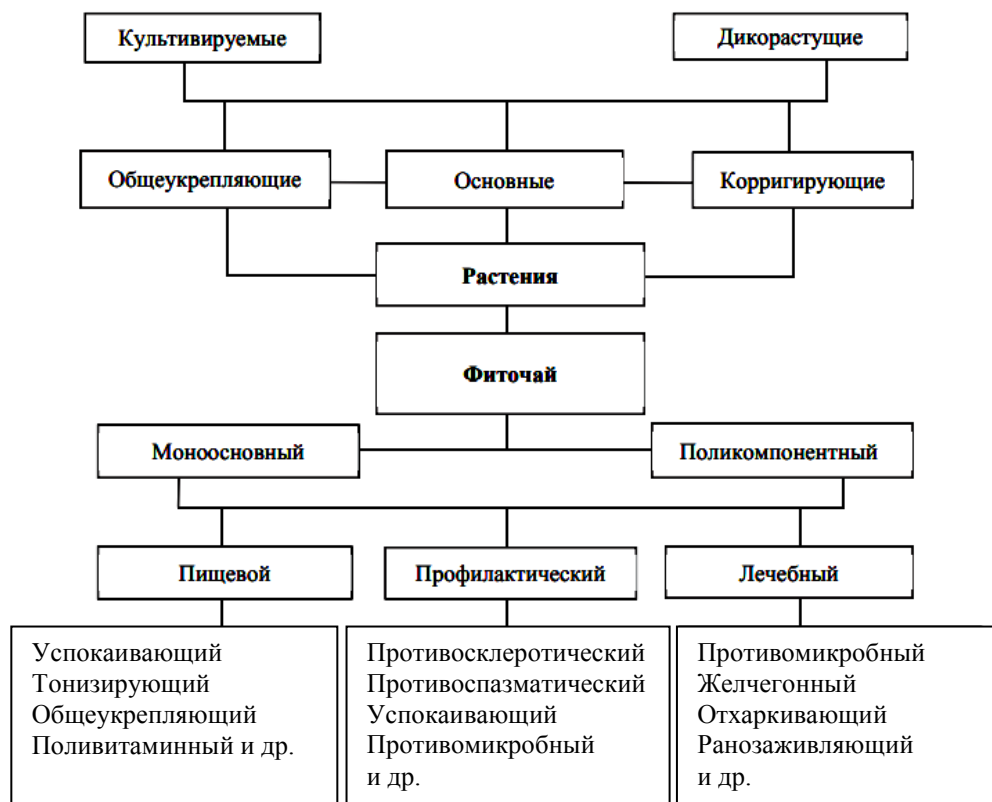


Рис. 1. Классификация фиточаев

Поликомпонентные составы находят все больше сторонников. Например, известен патент на фиточай, состоящий из 77 трав. Однако необходимо отметить, что поликомпонентные композиции, помимо положительных черт, имеют и ряд недостатков: длительное время заваривания, неравномерное распределение вкусоароматических и биологических веществ по порциям продукта (в результате транспортировки и хранения). Кроме того, слишком большое количество компонентов не позволяет им в полной мере проявлять полезные свойства, так как направленное действие одного компонента может нейтрализоваться действием другого [10].

Вместе с тем экспериментально установлено, что практически невозможно в экстракте получить то количество экстрактивных (полезных) веществ, которое теоретически содержится в исходном сырье. По этой причине очень ценятся грамотно составленные композиции, которые позволяют уменьшить ингибирование процесса высвобождения полезных веществ в экстракт сопутствующими веществами. При разработке композиций фиточаев необходимо принимать во внимание дозировки действующих веществ растений для достижения заявленного эффекта.

На рис. 2 продемонстрирована частота встречаемости растительного сырья в рецептурах фиточаев.

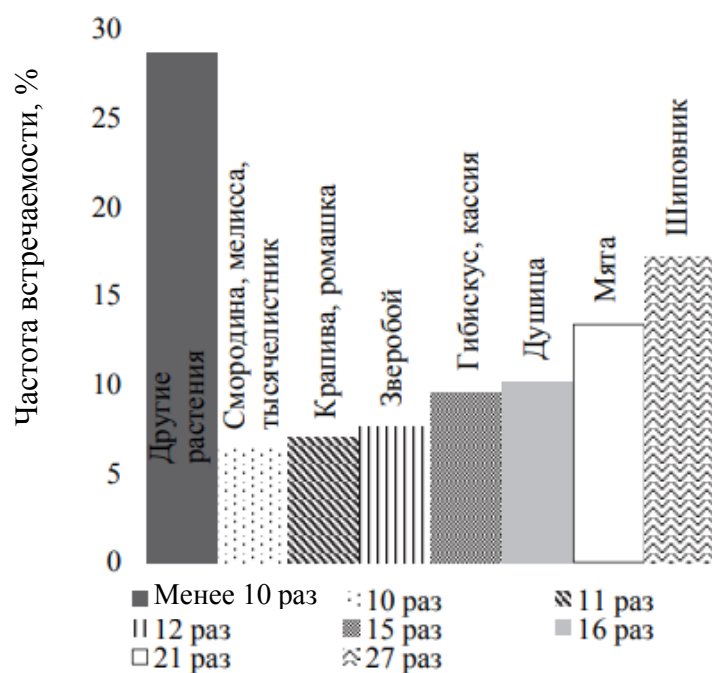


Рис. 2. Частота встречаемости растительного сырья в рецептурах фиточаев

Из рис. 2 видно, что наиболее часто в композициях фиточаев встречаются следующие растения: шиповник, мята, душица, гибискус, кассия, зверобой, крапива и ромашка.

МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Методика количественного определения полифенольных соединений в образцах фиточаев

Для исследования были взяты три образца фитосбора. Производители и торговые марки представлены в таблице.

Фитосборы, обладающие противовоспалительным действием

Номер образца	Название	Производитель
1	«Фиточай № 39»	ООО «Сила российских трав»
2	«Фитосбор № 1»	Green
3	«Опалиховский»	Green

Аналитическую пробу сырья измельчали до величины частиц, проходящих сквозь сито с отверстиями размером 3 мм. Помещали 1,0 г (точная навеска) измельченного сырья в коническую колбу с притертой пробкой и вместимостью 250 мл, прибавляли 50 мл 50%-го спирта и взвешивали с точностью $\pm 0,01$ г. Колбу с содержимым присоединяли к обратному холодильнику и нагревали на водяной бане в течение 1 ч. Полученное

извлечение охлаждали до комнатной температуры и взвешивали, при необходимости доводили 50%-м спиртом до первоначальной массы, фильтровали через беззольный фильтр, отбрасывая первые 10 мл фильтрата. В мерную колбу вместимостью 25 мл помещали 0,5 мл фильтрата, прибавляли 10 мл 50%-го спирта подкисленного, доводили объем раствора указанным спиртом до метки. Раствор сравнения – спирт 50%-й подкисленный.

Измеряли оптическую плотность испытуемого раствора на спектрофотометре при длинах волн 279 нм и 305 нм в кювете с толщиной слоя 1 см относительно раствора сравнения.

Содержание суммы полифенольных соединений в пересчете на (+)-катехин в сухом сырье в процентах (X) устанавливали по формуле

$$X = \frac{A \cdot 50 \cdot 25 \cdot 100}{144 \cdot a \cdot 0,5 \cdot (100 - W)}, \quad (1)$$

где A – оптическая плотность испытуемого раствора; a – навеска сырья, г; 144 – удельный показатель поглощения (+)-катехина в растворе 50%-го спирта подкисленного при длине волны 279 нм; W – влажность сырья, %.

Спектрофотометрический анализ полифенольных соединений по галловой кислоте и танину

Для спектрофотометрического анализа полифенольных соединений в пересчете на танин и галловую кислоту брали 2 г (точная навеска) измельченного сырья.

Для проведения исследования были приготовлены растворы стандартных образцов (PCO) галловой кислоты и танина.

Приготовление PCO галловой кислоты. Около 0,025 г (точная навеска) стандартного образца кислоты галловой переносят в мерную колбу объемом 50 мл, доводят очищенной водой до метки, 0,5 мл полученного раствора переносят в мерную колбу на 25 мл и доводят боратым буферным раствором до метки. Измеряют оптическую плотность раствора при длинах волн 275 ± 2 и 305 ± 2 нм.

Приготовление PCO танина. Около 0,025 г (точная навеска) стандартного образца танина переносят в мерную колбу на 50 мл, доводят очищенной водой до метки, 0,5 мл полученного раствора переносят в мерную колбу на 25 мл и доводят боратым буферным раствором до метки. Измеряют оптическую плотность раствора при длинах волн 275 ± 2 и 305 ± 2 нм.

Содержание галловой кислоты и танина в процентах в растворе в пересчете на абсолютно сухое сырье ($X_{гк}$ и X_m) устанавливают по следующим формулам:

$$C_{гк} = \frac{E_2^{\lambda 2} A^{\lambda 1} - E_2^{\lambda 1} A^{\lambda 2}}{(E_1^{\lambda 1} E_2^{\lambda 2} - E_1^{\lambda 2} E_2^{\lambda 1}) \ell}; \quad (2)$$

$$C_m = \frac{E_1^{\lambda 1} A^{\lambda 2} - E_1^{\lambda 2} A^{\lambda 1}}{(E_1^{\lambda 1} E_2^{\lambda 2} - E_1^{\lambda 2} E_2^{\lambda 1}) \ell}; \quad (3)$$

$$X_{гк} = \frac{C_{гк} W_1 W_2 \times 100}{a(100 - B) V_a}; \quad (4)$$

$$X_m = \frac{C_m W_1 W_2 \times 100}{a(100 - B) V_a}, \quad (5)$$

где $A^{\lambda 1}$ – оптическая плотность исследуемого раствора по галловой кислоте при длине волны 275 ± 2 нм; $A^{\lambda 2}$ – оптическая плотность исследуемого раствора по танину при длине

волны 305 ± 2 нм; a – масса сырья, г; B – потеря в массе при высушивании сырья, %; W_1 и W_2 – объем мерных колб, взятых для разведения, мл; V_a – объем аликвоты извлечения, взятой на анализ, мл; E^{λ_1} – величина удельного показателя поглощения при 275 ± 2 нм; E^{λ_2} – величина удельного показателя поглощения при 305 ± 2 нм; l – толщина кюветы, 1 см.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Количественное определение полифенольных соединений в фиточаях

На рис. 3 представлены полученные расчетные данные спектрофотометрического анализа водных и спиртовых полифенольных извлечений исследуемых образцов фитосборов, обладающих противовоспалительным и иммуномодулирующим действием.

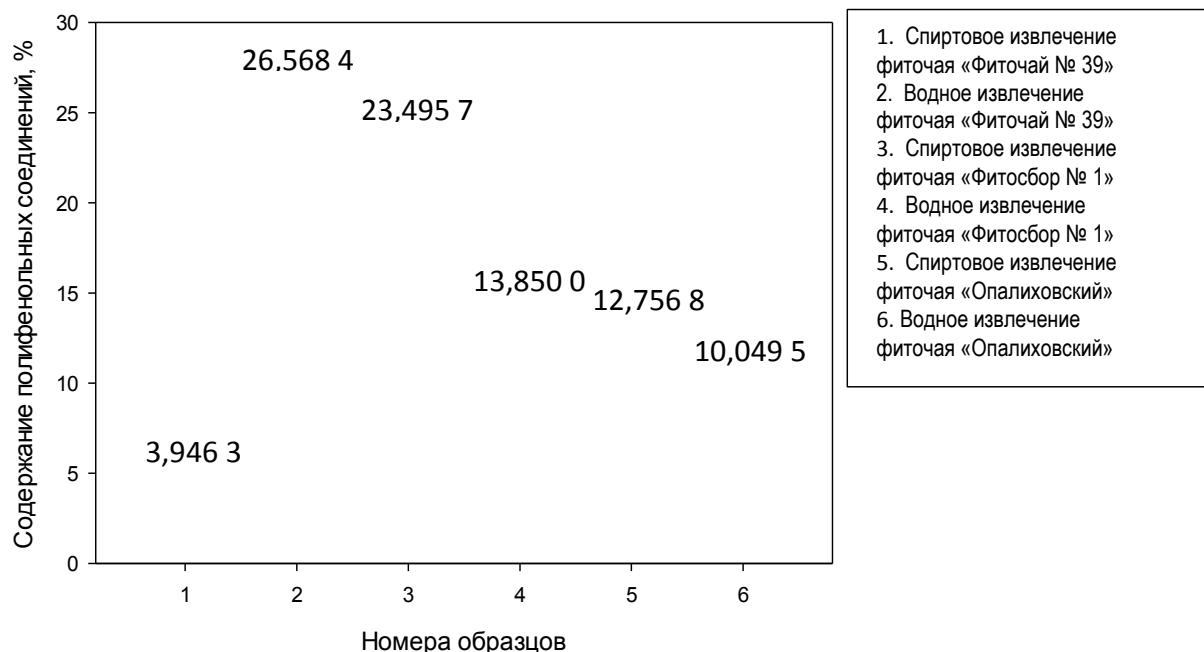


Рис. 3. Диаграмма суммарного содержания полифенольных соединений, рассчитанных по катехину, галловой кислоте и танину в исследуемых фиточаях

Согласно полученным данным, наибольшее количество полифенольных соединений содержится в водном извлечении фиточая «Фиточай № 39» (26,5 %), наименьшее содержание – в спиртовом извлечении этого же фиточая (3,9 %). Результаты показывают, что оптимальным способом извлечения полифенольных соединений является водное, так как применение спирта в качестве экстрагента приводит к экстракции балластных веществ в виде белков и углеводов, что существенно мешает спектрофотометрическому определению количественного содержания полифенольных веществ, основанному на законе Бугера – Ламберта – Бера.

Анализируя расчетные данные, можно сделать вывод, что максимумы светопоглощения приходятся на длину волны 275 ± 4 нм и 305 ± 2 нм, а это свидетельствует о наличии в фиточаях полифенольных соединений типа гидролизуемых по галловой кислоте и негидролизуемых по танину в приблизительно равных количествах. Больше всего танина содержится в спиртовом извлечении фиточая «Фитосбор № 1» (12,7 %), а галловой кислоты – в спиртовом извлечении фиточая «Опалиховский» (10,2 %).

Спектрофотометрия является более точным методом, однако выбранная методика определяет лишь дубильные вещества в пересчете на танин и галловую кислоту. Данный метод уникален, поскольку исключает погрешность в виде примесей и позволяет изучать отдельные дубильные вещества без их разделения.

На основе проделанной работы можно сделать вывод об актуальности количественного определения отдельных биологически активных компонентов фитосборов, таких как полифенольные соединения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значимость настоящей работы продиктована возрастающей потребностью в эффективных и безопасных натуральных средствах для профилактики и вспомогательной терапии воспалительных заболеваний, а также необходимостью научного обоснования качества и стандартизации фитопродукции. Результаты исследования подтверждают важность количественного определения полифенольного состава методом ультрафиолетовой спектрофотометрии как одного из ключевых факторов, оказывающих влияние на противовоспалительную и иммуномодулирующую активность. Полученные данные о качестве исследованных коммерческих образцов фиточаев могут быть полезны как для специалистов в области фармации и медицины, так и для потребителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куркин В.А. Фармакогнозия: учебник. Самара: Офорт; СамГМУ, 2004. 1239 с.
2. Тараховский Ю.С., Ким Ю.А., Абрасимов Б.С., Музафаров Е.Н. Флавоноиды: биохимия, биофизика, медицина: монография. Пушино: Synchrobook, 2013. 310 с.
3. Singla R.K., Dubey A.K., Garg A., Sharma R. Natural Polyphenols: Chemical Classification, Definition of Classes, Subcategories, and Structures // *J. AOAC Int.* 2019. Vol. 102. No. 5, pp. 1397–1400.
4. Zhang L., Han Z., Granato D. Classification, Methods of Identification, and Nutritional Aspects in Human Health // *Adv. Food Nutr. Res.* 2021. Vol. 98. P. 1–33.
5. Муравьева Д.А., Самылина И.А., Яковлев Г.П. Фармакогнозия: учебник. М.: Медицина, 2002. 656 с.
6. Остроухова Л.А., Федорова Т.Е., Онучина Н.А., Левчук А.А., Бабкин В.А. Определение количественного содержания экстрактивных веществ из древесины, корней и коры деревьев хвойных видов Сибири: лиственницы (*Larix sibirica* L.), сосны (*Pinus sylvestris* L.), пихты (*Abies sibirica* L.), ели (*Picea obovata* L.) и кедра (*Pinus sibirica* du tour.) // *Химия растительного сырья*. 2018. № 4. С. 185–195.
7. Муравьева Д.А. Фармакогнозия: учебник. М.: Медицина, 1978. 656 с.
8. Antioxidant, Anti-inflammatory Activities and Polyphenol Profile of *Rhamnus Prinoides* / G.-L. Chen [et al.] // *Pharmaceuticals*. 2020. Vol. 13. No. 4. P. 55.
9. Патент РФ 2346452. *Травяной чай* / Касьяненко С.В., Евневич А.А. Заявл. 20.09.2007. Оpubл. 20.02.2009, Бюл. № 5.

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. Исследование оптимальных методов количественного определения полифенольных соединений в фитосборах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 3 (27). С. 86–95.

RESEARCH OF OPTIMAL METHODS FOR QUANTITATIVE DETERMINATION OF POLYPHENOL COMPOUNDS IN HERBAL BRANCHES

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

Abstract. This study quantified polyphenolic compounds in the herbal teas "Phytotea No. 39", "Phytosbor No. 1", and "Opalikhovsky". The highest amount of polyphenolic compounds was found in the aqueous extract of "Phytotea No. 39" (26,57 %), while the lowest amount was found in the alcoholic extract of the same tea (3,94 %), calculated as catechin. Spectrophotometric analysis of polyphenolic compounds calculated as gallic acid and tannin was deemed optimal for quantifying total polyphenolic compounds.

Keywords: polyphenolic compounds, gallic acid, tanin, herbal medicine, medicinal plant, raw materials complex.

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 Yurievich – 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. Research of optimal methods for quantitative determination of polyphenol compounds in herbal branches // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 3 (27), pp. 86–95.

УДК 544.773.2

ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА СКОРОСТЬ ОКИСЛЕНИЯ СУЛЬФИТА НАТРИЯ

А.В. Старовойтов, А.И. Пичугина, В.Ю. Долуда, А.Е. Соболев
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Старовойтов А.В., Пичугина А.И.,
Долуда В.Ю., Соболев А.Е., 2025

Аннотация. Исследовано влияние органических добавок на скорость окисления сульфит-ионов кислородом воздуха в водных растворах. Отмечено, что органические добавки могут как ускорять, так и замедлять процесс окисления сульфит-ионов растворенным кислородом. Показано, что малые концентрации спирта способны полностью подавлять реакцию окисления сульфит-ионов растворенным кислородом воздуха.

Ключевые слова: сульфит натрия, реакция окисления, водно-спиртовой раствор.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-95-100

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач химической технологии является извлечение благородных металлов, в частности золота и серебра, из электронного лома или ювелирных изделий. Традиционные способы извлечения благородных металлов основаны на их растворении в водных растворах, которые содержат одновременно окислитель и комплексообразователь. Другой способ – это электролитическое анодное окисление, которое осуществляется без введения в раствор окислителя. Перспективным комплексообразователем в процессах электрохимического окисления благородных металлов является сульфит натрия. Потенциал сульфит-ионов в качестве комплексообразователя обусловлен тем, что они образуют прочные комплексы с ограниченным количеством металлов. Кроме того, сульфит можно использовать в щелочной среде, в которой многие другие переходные металлы образуют нерастворимые

гидроксиды. Все это позволяет ожидать высокой селективности при извлечении золота или серебра в раствор в присутствии других металлов. В то же время известно, что сульфит-ионы неустойчивы к действию кислорода воздуха. Вероятно, именно широко распространенное мнение о быстром окислении кислородом послужило препятствием для разработки методов, в рамках которых сульфит-ионы используются в качестве комплексообразователей. Кинетика и механизм окисления SO_3^{2-} в водных растворах достаточно подробно изучены в источниках [1–5]. Кроме того, в работах [1, 2] упоминается, что наличие в водном растворе даже следовых количеств спирта способствует резкому снижению скорости окисления сульфит-ионов растворенным кислородом. Поэтому основная цель данной работы состоит в получении количественных оценок устойчивости сульфитных сред к окислению в присутствии добавок различных органических веществ.

МЕТОДЫ, МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ

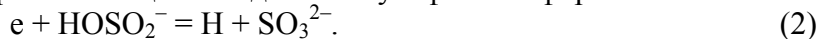
Эксперименты по изучению устойчивости растворов Na_2SO_3 проводили следующим образом. Свежеприготовленный водный раствор (объемом 250 мл), содержащий сульфит натрия ($C(\text{Na}_2\text{SO}_3) = 0,1$ моль/л) и добавку органических веществ, помещали в стакан (диаметр открытой части, через которую осуществляется контакт раствора с атмосферой, равен 6 см). В течение всего эксперимента проводили продувку воздуха через раствор для насыщения его кислородом. Кроме специально оговоренных случаев, для всех растворов характерна естественная рН среды. Через заданные промежутки времени осуществляли отбор проб. Концентрацию сульфита в пробах определяли методом йодометрического титрования [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

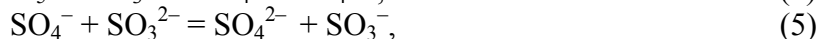
Система «вода – сульфит» довольно хорошо изучена. Окисление сульфит-ионов в водных растворах растворенным кислородом протекает по свободнорадикальному цепному механизму [1, 2]. После поглощения сульфит-ионом кванта света он превращается в свободный радикал SO_3^- :



Высвободившийся электрон поглощается одной из сульфитных форм:



После образования свободный радикал запускает цепь взаимодействий:



а также реакцию обрыва цепи.

Интересно, что в работе [2] исследование кинетики окисления сульфит-ионов кислородом проводилось в условиях полной темноты. При этом кинетические закономерности мало отличались от результатов, полученных при освещении. Авторы работы предполагают, что это связано либо с частичной засветкой на этапе приготовления растворов и значительным временем жизни радикалов (от момента приготовления растворов до начала эксперимента прошло порядка 30 мин), либо с иным способом инициации.

В работе [1] сообщается, что спирты поглощают свет в той же области излучения, которое требуется для инициации цепной реакции. Таким образом, при определенной концентрации спирта (или других веществ, обладающих аналогичными свойствами)

возможно полное поглощение иницирующей части спектра и, следовательно, полное подавление процесса окисления сульфит-ионов растворенным кислородом.

На рис. 1 представлены зависимости концентрации сульфит-ионов от продолжительности продувки воздухом сульфитного раствора в присутствии добавок различных органических соединений и при различной рН среды. Начальная концентрация Na_2SO_3 для всех растворов равна 0,1 моль/л, концентрация добавок во всех растворах – 0,2 моль/л.

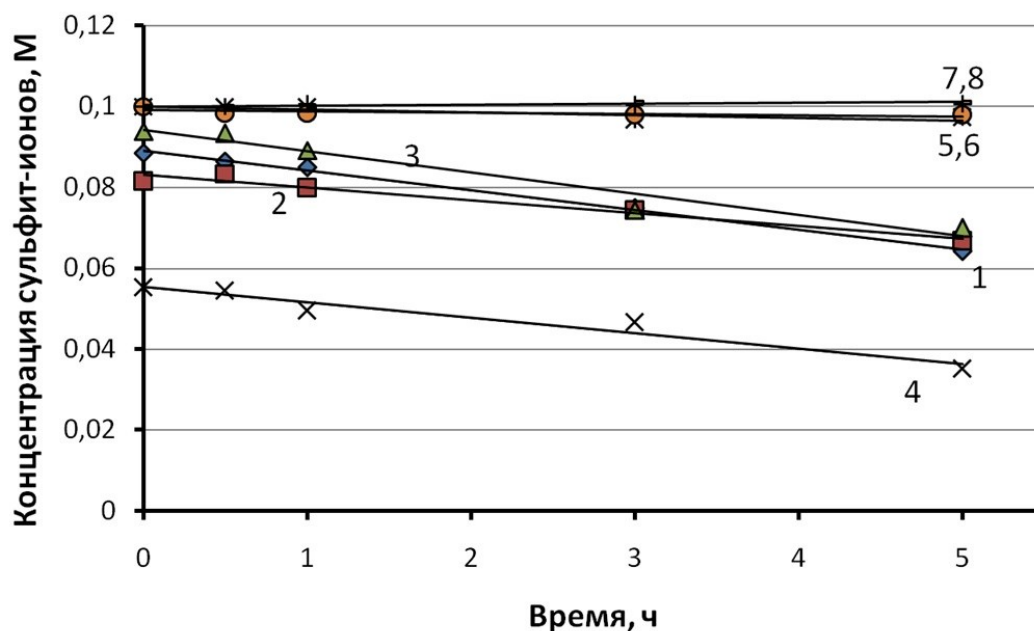


Рис. 1. Зависимость остаточной концентрации сульфит-ионов в растворе от продолжительности проведения эксперимента:
1 – без добавок при рН = 7; 2 – без добавок при рН = 10; 3 – с ацетатом натрия;
4 – с ацетоном; 5 – с этанолом; 6 – с изопропанолом;
7 – с бутанолом-1; 8 – с глицерином

Кривые 1 и 2 (см. рис. 1) показывают скорость окисления сульфит-ионов в растворах без добавок. Видно, что начало этих кривых лежит значительно ниже начальной концентрации 0,1 моль/л. Это связано с частичным окислением сульфита уже на этапе приготовления растворов. Некоторое расхождение в скорости окисления (наклоне кривых) из-за различий в величинах рН растворов согласуется с литературными данными. Зависимость скорости окисления сульфит-ионов от рН проходит через максимум в области рН = 6–8 [5].

Добавка ацетата натрия (кривая 3) не влияет на скорость окисления сульфита. Добавление ацетона (кривая 4) резко увеличивает скорость окисления на этапе приготовления растворов. Однако в дальнейшем наклон кривой мало отличается от наклонов кривых без добавки.

Все сульфитные растворы с добавлением спиртов (кривые 5–8) показали похожие результаты. Добавление любых спиртов повышает стойкость сульфитных растворов к окислению. Естественный рН среды для всех спиртовых растворов находился в интервале 7,5–8,5.

На рис. 2 представлена зависимость скорости окисления сульфит-ионов от концентрации спирта в растворе. Скорость окисления по своей сути характеризует степень наклона кривой окисления сульфитного раствора (примеры таких кривых с наклоном были представлены на рис. 1). Для исследования был выбран изопропиловый спирт. Кривая, на рис. 2 характеризуется перегибом при концентрации изопропилового спирта, равной 0,01 М. Для снижения скорости окисления сульфита натрия в 10 раз относительно раствора без добавок потребуется концентрация спирта, равная 0,03 М. При концентрации изопропанола более 0,2 М кривая пересекает ось концентраций и скорость окисления становится положительной. Это означает, что если окисление сульфита натрия проводится при концентрациях спирта выше 0,2 М, то концентрация Na_2SO_3 в растворе не убывает, а возрастает. Объяснение заключается в том, что растворитель испаряется быстрее, чем окисляется сульфит натрия.

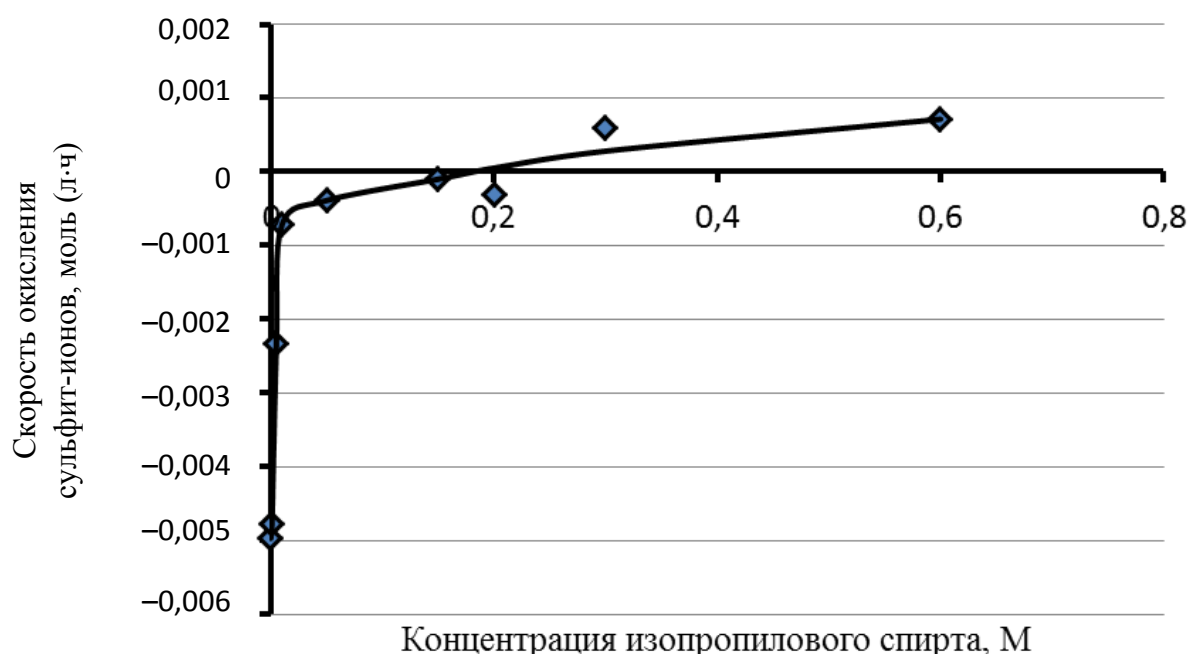


Рис. 2. Зависимость скорости окисления сульфит-ионов от концентрации спирта

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана принципиальная возможность повышения устойчивости сульфитных растворов к окислению растворенным кислородом воздуха за счет добавления небольшого количества спирта. Это может быть использовано для улучшения технологии электрохимического извлечения благородных металлов из электронного лома или для совершенствования технологии нанесения благородных металлов на металлические поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hayon E., Treinin A., Wilf J. Electronic Spectra, Photochemistry, and Autoxidation Mechanism of the Sulfite-bisulfite-pyrosulfite Systems. The SO_2^- , SO_3^- , SO_4^- , and SO_5^- Radicals // *Journal of the American Chemical Society*. 1972. No. 12. P. 47–57.
2. Hui P.K., Palmer H.J. Uncatalyzed Oxidation of Aqueous Sodium Sulfite and its Ability to Simulate Bacterial Respiration // *Biotechnology And Bioengineering*. 1991. Vol. 37. P. 392–396.
3. Guthrie J.P. Tautomeric Equilibria and pK_a Values for 'Sulfurous Acid' in Aqueous Solution: a Thermodynamic Analysis // *Canadian Journal of Chemistry*. 1979. Vol. 57. P. 454–457.
4. Васеха М.В. Спектрофотометрическое изучение кислых сульфитных // *Вестник МГТУ*. 2012. Т. 15. № 3. С. 562–567.
5. Zhang J.-Z., Millero F.J. The Rate of Sulfite Oxidation in Seawater // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1991. Vol. 55. P. 677–685.
6. Луцик В.И., Соболев А.Е., Чурсанов Ю.В. Физико-химические методы анализа. Тверь: ТвГТУ, 2021. 212 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СТАРОВОЙТОВ Анатолий Владимирович – старший преподаватель кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: avstarovoytov7@yandex.ru

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

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Старовойтов А.В., Пичугина А.И., Долуда В.Ю., Соболев А.Е. Влияние органических добавок на скорость окисления сульфита натрия // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 3 (27). С. 95–100.

**EFFECT OF ORGANIC ADDITIVES
ON THE OXIDATION RATE OF SODIUM SULFITE**

A.V. Starovoytov, A.I. Pichugina, V.Yu. Doluda, A.E. Sobolev
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The effect of organic additives on the rate of sulfite ion oxidation in aqueous solutions by atmospheric oxygen was studied. It was noted that organic additives can both accelerate and slow down the oxidation of sulfite ions by dissolved oxygen. It was shown that low concentrations of alcohol can completely suppress the oxidation of sulfite ions by dissolved oxygen.

Keywords: sodium sulfite, oxidation reaction, aqueous-alcoholic solution.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

STAROVOYTOV Anatoly Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: avstarovoytov7@yandex.ru

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

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

SOBOLEV Alexander Evgenevich – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Starovoytov A.V., Pichugina A.I., Doluda V.Yu., Sobolev A.E. Effect of organic additives on the oxidation rate of sodium sulfite // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 3 (27), pp. 95–100.

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. М. Ауэзова, г. Чимкент, 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

№ 3 (27), 2025

Редактор С.В. Борисов
Корректор Ю.Ф. Воробьева

Подписано в печать 29.12.2025

Дата выхода в свет 30.12.2025

Формат 60 x 84 1/8

Физ. печ. л. 12,75

Тираж 500 экз.

Цена свободная

Усл. печ. л. 11,86

Заказ № 51177

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 11,09

С – 94

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