

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

№ 4 (28), 2025

Тверь 2025

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2025. № 4 (28). 106 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> Особенности выбора оптимальной конфигурации ребристого купола.....	5
<i>Белов В.В., Смирнов М.А.</i> Подбор оптимального зернового состава заполнителей дорожного бетона с использованием компьютерного моделирования.....	12
<i>Курятников Ю.Ю.</i> Разработка самовосстанавливающегося бетона.....	17
<i>Левиков А.В.</i> Обоснование оптимального проектного решения устройства приточно-вытяжной вентиляции в многоквартирном жилом доме площадью до 150 м ²	23

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Комнатный Д.В.</i> Модели паразитных антенн в узлах оборудования ключевых систем информационной инфраструктуры с учетом резонансных режимов.....	28
<i>Куликова М.А., Чеботарев Я.А., Торгованова О.Н., Корнеев К.Б.</i> Методы объяснимого искусственного интеллекта для энергетических и электроэнергетических систем: возможности применения.....	35
<i>Макаров А.Н.</i> Обучение студентов университетов инженеринговой, инновационной работе на основе выполненных в ТвГТУ НИР. Часть I. Проблема обучения студентов университетов и конструкторов расчетам теплообмена в печах, топках, камерах сгорания.....	44
<i>Павлова Ю.М., Корнеев К.Б., Корнеев В.К.</i> Эволюционные алгоритмы для оптимального энергопотребления: обзор и анализ.....	54
<i>Шум Ал.А., Ветошкин А.М.</i> Дополнение к теореме о линиях n-симметрии плоской пластины	67

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Курагин А.А., Пичугина А.И., Лагушева Е.И., Старовойтов А.В., Чалов К.В., Долуда В.Ю.</i> Аналитические особенности определения состава газовой фазы реакционной массы процесса синтеза формальдегида и его производных каталитической трансформацией диоксида углерода.	78
<i>Петрова А.И., Цветков Д.Ю., Лакина Н.В., Долуда В.Ю., Сульман М.Г.</i> Изучение влияния параметров реакции на каталитическое окисление глюкозы с использованием Pt/Al ₂ O ₃	84
<i>Пичугина А.И., Созонтова А.С., Старовойтова Н.Ю., Устимов А.В., Долуда В.Ю.</i> Исследование фотоинициированной сополимеризации метилметакрилатных и акрилонитрильных смол для аддитивных технологий.....	91
<i>Цветков Д.Ю., Петрова А.И., Лакина Н.В., Долуда В.Ю., Сульман М.Г.</i> Особенности каталитического окисления L-сорбозы на платиновых катализаторах....	97

CONTENTS

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Barkaya T.R., Sokolov S.A., Dvuzhilov A.S. Features of choosing the optimal configuration of the ribbed dome	5
Belov V.V., Smirnov M.A. Selection of optimal grain composition of road concrete aggregates using computer simulation	12
Kuryatnikov Yu.Yu. Development of self-repairing concrete.....	17
Levikov A.V. Justification of the optimal design solution for the installation of supply and exhaust ventilation in a single-apartment residential building with an area of up to 150 m ²	23

ELECTRICAL ENGINEERING

Komnatny D.V. The models of parasitic antennas in units of key systems of information infrastructure taking into account resonance regimes.....	28
Kulikova M.A., Chebotarev Ya.A., Torgovanova O.N., Korneev K.B. Methods of explainable artificial intelligence for power and electric power systems: application possibilities	35
Makarov A.N. Training university students in engineering, innovative work based on the research work performed at Tver State Technical University. Part I. The problem of training university students and designers in heat transfer calculations in furnaces, furnaces, combustion chambers.....	44
Pavlova Yu.M., Korneev K.B., Korneev V.K. Evolutionary algorithms for optimal energy consumption: a comprehensive review and analysis	54
Shum Al.A., Vetoshkin A.M. Addition to the theorem on the n-symmetry lines of a flat plate.....	67

CHEMICAL TECHNOLOGY

Kuragin A.A., Pichugina A.I., Laguseva E.I., Starovoytov A.V., Chalov K.V., Doluda V.Yu. Analytical features of determining the composition of the gas phase of the reaction mass in the process of synthesis of formaldehyde and its derivatives by catalytic transformation of carbon dioxide.....	78
Petrova A.I., Tsvetkov D.Yu., Lakina N.V., Doluda V.Yu., Sulman M.G. Studying the effect of reaction parameters on catalytic oxidation of glucose using Pt/Al ₂ O ₃	84
Pichugina A.I., Sozontova A.S., Starovoytova N.Yu., Ustimov A.V., Doluda V.Yu. Research of photoinitiated copolymerization of methyl methacrylate and acrylonitrile resins for additive technologies.....	91
Tsvetkov D.Yu., Petrova A.I., Lakina N.V., Doluda V.Yu., Sulman M.G. Features of catalytic oxidation of L-sorbose on platinum catalysts.....	97

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 624.074.2

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ РЕБРИСТОГО КУПОЛА

*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 статье рассматриваются расчет, проектирование купольных конструкций, а также выбор оптимальных геометрических параметров купола в зависимости от высоты стрелы и градуса сектора ребер конструкции. Представлены выводы проведенного исследования.

Ключевые слова: купол, покрытие, металлические конструкции, оптимальные параметры.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-5-12

ВВЕДЕНИЕ

Новейшие исследования однозначно подтверждают значительную выгоду от активного использования металлических конструкций в строительстве. Общая направленность развития современной строительной отрасли – это разработка и внедрение легких пространственных решений, которые находят широкое применение в различных сферах: гражданском, промышленном и сельскохозяйственном строительстве. Здания с куполами позволяют максимально реализовать принцип открытой планировки и отличаются привлекательным внешним видом и внутренним обликом. Практический опыт проектирования и возведения объектов демонстрирует, что купольные системы способны перекрывать большие площади, являясь одной из наиболее эффективных конструктивных схем как с точки зрения визуальной составляющей, так и с точки зрения экономии материала. В связи с этим разработка эффективных и экономичных купольных систем остается приоритетным направлением в создании новых видов покрытий и представляет собой важную и актуальную проблему.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Задание геометрических параметров купольной конструкции. Расчеты выполнялись в соответствии с СП 494.1325800.2020 «Конструкции покрытий пространственные металлические. Правила проектирования». Основными геометрическими параметрами для определения оптимальной конструкции ребристого купола являются высота стрелы (рис. 1) и градус сектора (рис. 2) [1, 5]. Здания с купольными круговыми и близкими к ним по очертанию покрытиями имеют следующие приложенные нагрузки (рис. 3).

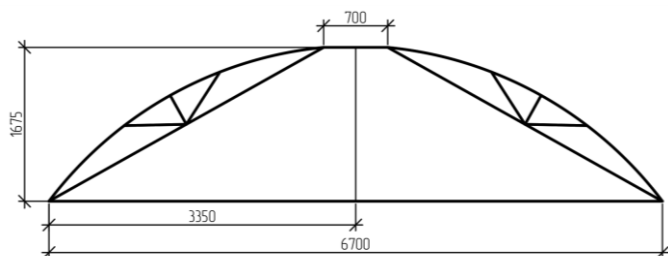


Рис. 1. Схема полуарки с отношением высоты к диаметру 1/4 (рисунок авторов)

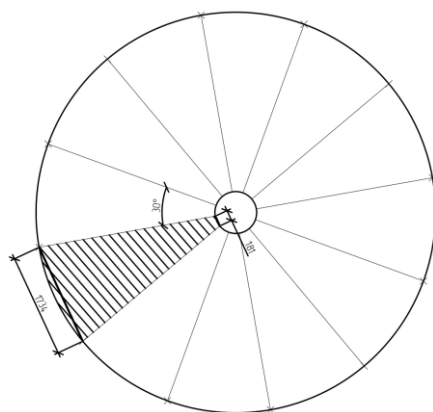


Рис. 2. Грузовые площади для купола с углом сектора 30° (рисунок авторов)

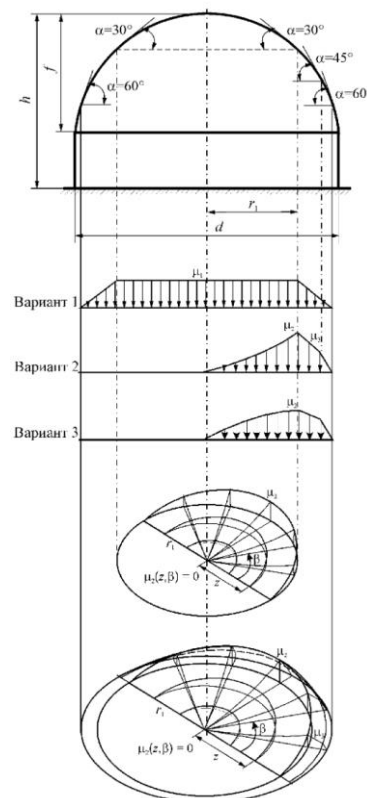


Рис. 3. Схема приложения нагрузок [1]

В расчете используются 1-й и 2-й варианты нагрузок, так как 3-й вариант следует учитывать для куполов только при сильно шероховатой поверхности покрытия, наличии возвышающихся надстроек, фонарей или снегозадерживающих преград [3], а также для покрытий, защищенных от ветра соседними более высокими зданиями или объектами окружающей застройки [4].

После задания начальных условий был произведен расчет нагрузок, приложенных на покрытие, таких как собственный вес, вес конструктивных слоев покрытия, эксплуатационная и снеговая нагрузка [2]. Два варианта снеговой нагрузки по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» приведены в табл. 1.

Таблица 1

Снеговая нагрузка на купол

Снеговая нагрузка (вариант 1)					
Нагрузка, кг/м ²	39,4	210	210	210	39,4
Расстояние, мм	0	1 270	3 350	5 430	6 700
Снеговая нагрузка (вариант 2)					
Нагрузка, кг/м ²	0	0	0	521,2	136
Расстояние, мм	0	1 270	3 350	5 430	6 700

Основной критерий оценки купола – величина снеговой нагрузки второго варианта. Ниже представлены схемы распределения снеговой нагрузки для целой полуарки (рис. 4, 5) для двух первых вариантов по рис. 3.

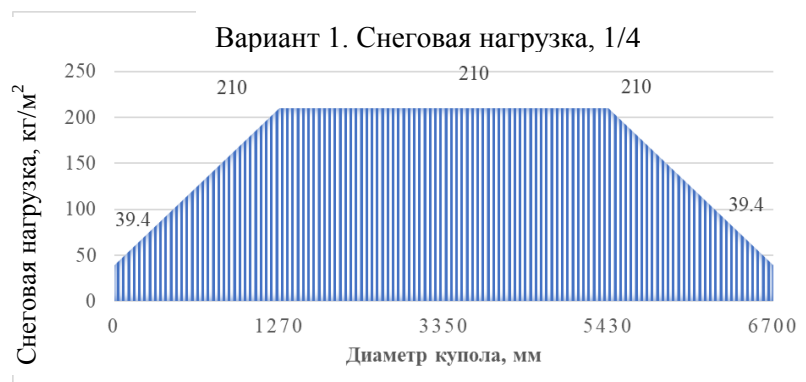


Рис. 4. Эпюра распределения снеговой нагрузки для целой полуарки по 1-му варианту нагружения (рисунок автора)

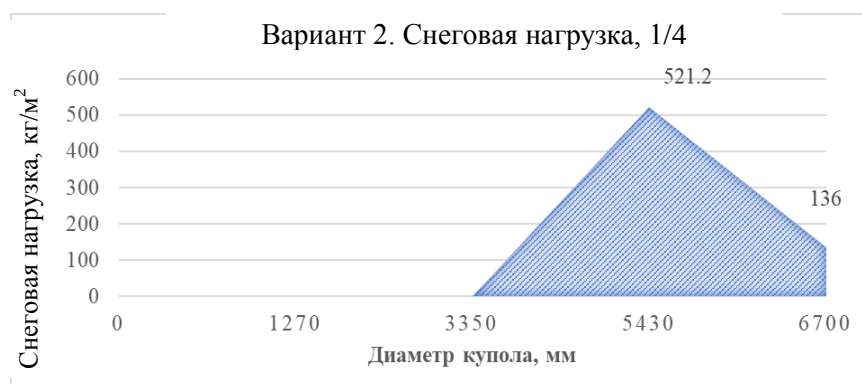


Рис. 5. Эпюра распределения снеговой нагрузки для целой полуарки по 2-му варианту нагружения (рисунок авторов)

Далее было проведено преобразование нагрузки на купол в нагрузку на сектор с учетом грузовой площади для углов 10, 20, 30, 40, 60°. Расчет производился с использованием программы MS Excel. Для иллюстрации на рис. 6, 7 приведены эпюры, а в табл. 2 значения снеговых нагрузок для полуарки с углом сектора 10°.

Таблица 2

Снеговая нагрузка для полуарки с углом сектора 10 градусов

Снеговая нагрузка (вариант 1)			
Нагрузка, кг/м²	39,40	210,00	210,00
Расстояние, мм	0,00	1 270,00	3 350,00
Грузовые площади, мм	583,00	363,00	61,00
Итоговая нагрузка с учетом сектора, кг/м	22,97	76,23	12,81
Снеговая нагрузка (вариант 2)			
Нагрузка, кг/м²	136,00	521,20	0,00

Окончание табл. 2

Снеговая нагрузка (вариант 2)			
Расстояние, мм	0,00	1 270,00	3 350,00
Грузовые площади, мм	583,00	363,00	61,00
Итоговая нагрузка с учетом сектора, кг/м	79,29	189,20	0,00

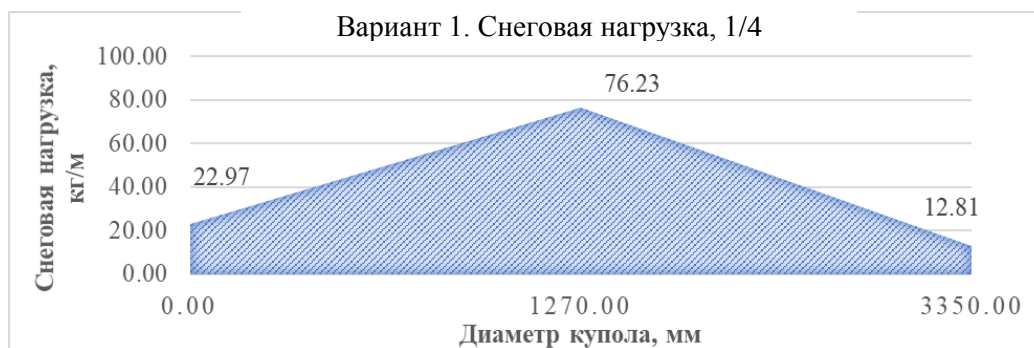


Рис. 6. Эпюра загрузки полуарки от снеговой нагрузки по 1-му варианту (рисунок автора)

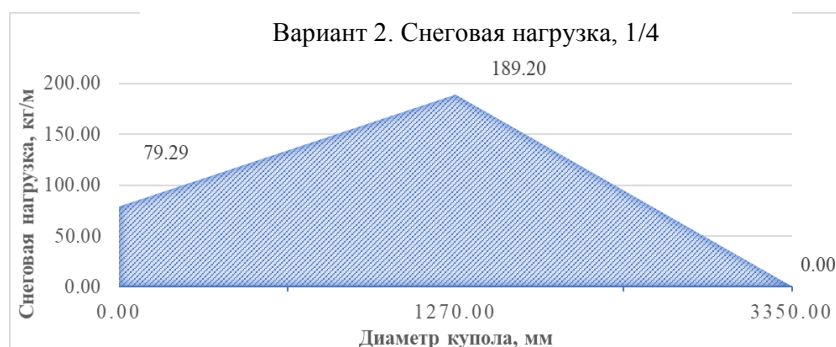


Рис. 7. Эпюра загрузки полуарки от снеговой нагрузки по 2-му варианту (рисунок авторов)

После создания расчетной схемы полуарок в программно-вычислительном комплексе (ПВК) были сформированы загрузки с использованием полученных значений нагрузок и вычислены равнодействующие силы для каждого купола с последующим построением графиков для стрелы $D/4$ (рис. 8). Также был проведен расчет снеговой нагрузки, учитывающий ее неравномерное распределение.

На основе графиков (рис. 8) можно сделать предварительный вывод о том, что учитывать снижение снеговой нагрузки в зависимости от угла сегмента по СП 494.1325800.2020 нецелесообразно, так как средняя погрешность составила менее 5 %. Такая погрешность не может приводить к значительному перерасходу материала, следовательно, дальнейшие расчеты можно выполнить без описанного выше уточнения значений снеговой нагрузки.

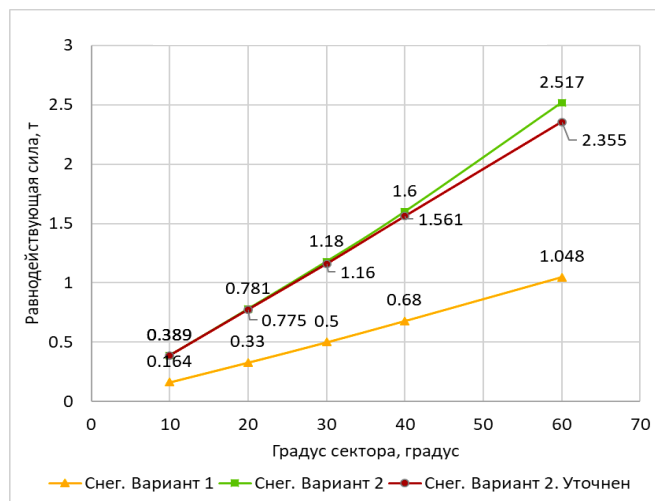


Рис. 8. Итоговый график для D/4 стрелы и уточненной снеговой нагрузки (рисунок авторов)

Для систематизации и обобщения итогов проведенного исследования были получены соответствующие данные и построены графики для углов сектора 10, 20, 30, 40, 60° при высотах стрелы полуарки, равных 1/2, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8 диаметра купола (рис. 9).

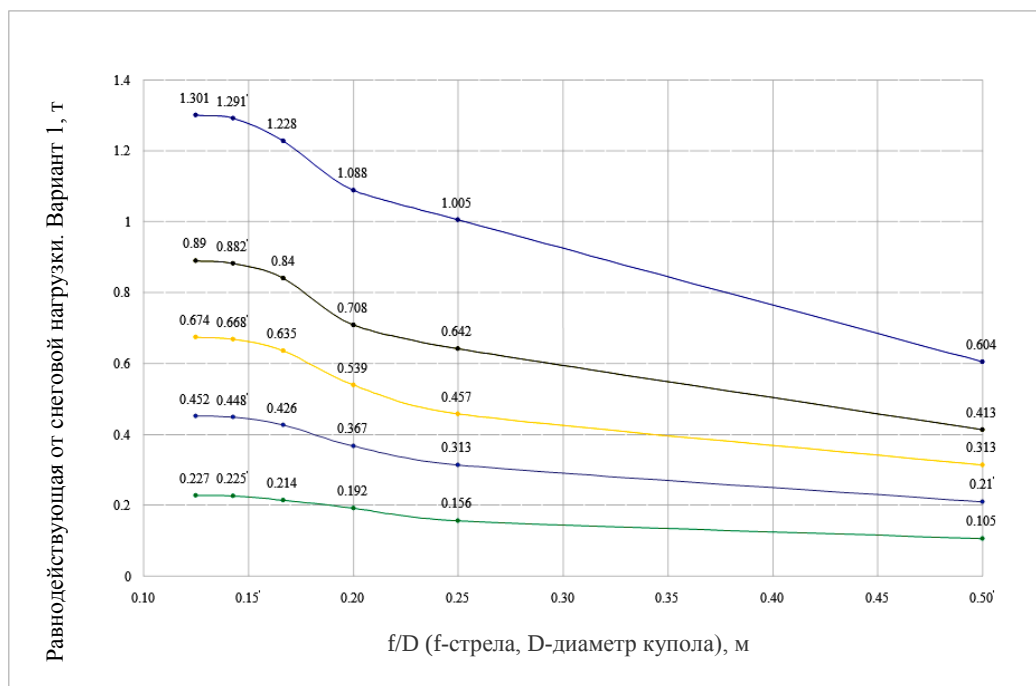


Рис. 9. Зависимость равнодействующей силы от высоты стрелы

Как видно из графиков, при величинах стрелы подъема купола, равных D/6 и менее, происходит резкий рост равнодействующей нагрузки на ребро сектора вне зависимости от его угла. Таким образом, оптимальная стрела купола находится в диапазоне от D/6 до D/2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для представленных выше значений стрел подъема купола, которые могут рассматриваться как оптимальные, была получена зависимость массы ребра купола от угла сектора между соседними ребрами (рис. 10). При определении материалоемкости конструктивного решения купол рассматривался как набор арок, объединенных между собой кольцевыми прогонами [6, 7].

Как видно из графика, материалоемкость ребра купола возрастает при большей стреле, равной $D/2$, хотя при данной стреле значение равнодействующей ниже. Это связано с тем, что с ростом стрелы возрастают изгибающие моменты в верхнем поясе фермы ребра, а также увеличивается его расчетная длина, что в конечном итоге и приводит к увеличению его веса. Кроме того, следует отметить, что с увеличением угла сектора между соседними ребрами масса ребра также возрастает. При этом указанный рост происходит значительно быстрее при стреле большей величины, например при $D/2$.

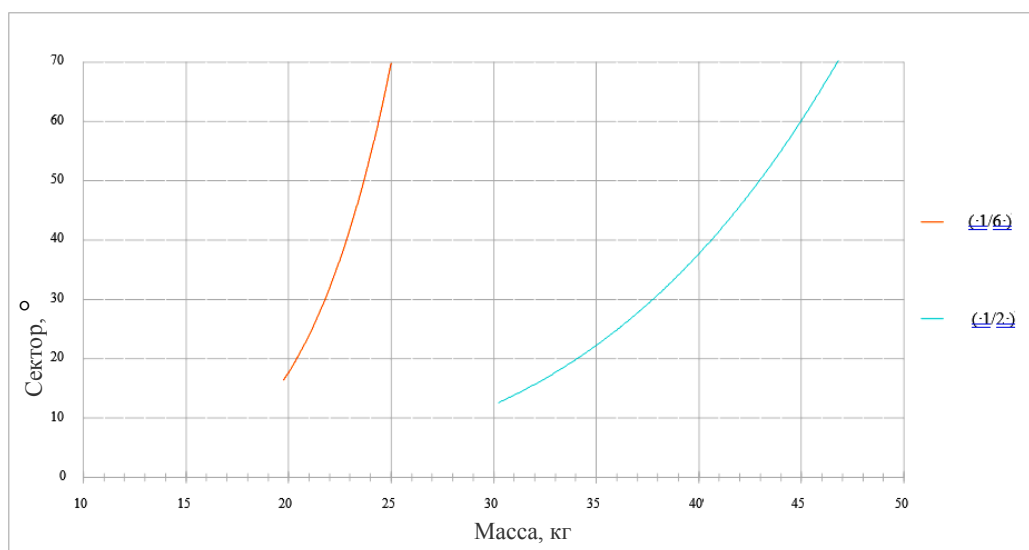


Рис. 10. Материалоемкость ребра купола в зависимости от угла сектора между ребрами

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных данных можно сделать вывод, что при вычислении величины равнодействующей силы, приходящейся на одно ребро купола, определяющей является снеговая нагрузка, собранная согласно варианту 2 (СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»). При этом уточнение указанной нагрузки в зависимости от угла сегмента не приводит к значительному снижению материалоемкости, поскольку величина равнодействующей на ребро изменяется менее чем на 5 %.

Далее следует отметить, что минимальные значения указанной равнодействующей силы наблюдаются при величинах стрелы купола в пределах от $D/6$ до $D/2$. При стреле купола менее $D/6$ наблюдается резкий скачок равнодействующей силы, что приводит к росту материалоемкости ребристого купола.

При оценке материалоемкости ребра купола на стрелах в пределах от $D/6$ до $D/2$ можно сделать однозначный вывод о том, что оптимальной стрелой купола является $D/6$, так как при данном значении достигается минимальный вес одного ребра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липницкий М.Е. Купола (расчет и проектирование). Ленинград: Стройиздат, 1973. 128 с.
2. Тур В.И. Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности: учебное пособие. М.: Издательство АСВ, 2004. 96 с.
3. Металлические конструкции: в 3 т. Общая часть. (Справочник проектировщика) / под общ. ред. В.В. Кузнецова. М.: Издательство АСВ, 1998. Т. 1. 576 с.
4. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения 10.09.2025).
5. СП 494.1325800.2020 Конструкции покрытий пространственные металлические. Правила проектирования. URL: <https://docs.cntd.ru/document/603253367> (дата обращения: 12.09.2025).
6. Трофимов В.И., Каминский А.М. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений. М.: Издательство АСВ, 2002. 573 с.
7. Проектирование металлических конструкций. Часть 2: «Металлические конструкции. Специальный курс»: учебник для вузов / А.Р. Туснин, В.А. Рыбаков, Т.В. Назмеева [и др.] / под общ. ред. А.Р. Туснина. М.: Издательство «Перо», 2023. 436 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАРКАЯ Темур Рауфович – 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: 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: anton_in_tver@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Баркая Т.Р., Соколов С.А., Двужилов А.С. Особенности выбора оптимальной конфигурации ребристого купола // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 4 (28). С. 5–12.

**FEATURES OF CHOOSING THE OPTIMAL CONFIGURATION
OF THE RIBBED DOME**

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

Abstract. The article discusses the calculation and design of dome structures, as well as the choice of optimal geometric parameters of the dome depending on the height of the boom and the degree of the sector of the ribs of the structure. The conclusions of the conducted research are presented.

Keywords: dome, coating, metal structures, optimal parameters.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BARKAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Constructions and Structures, 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 Constructions and Structures, 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 Materials Resistance, Elasticity and Plasticity Theory, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: anton_in_tver@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Barkaya T.R., Sokolov S.A., Dvuzhilov A.S. Features of choosing the optimal configuration of the ribbed dome // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 5–12.

УДК 691.517

**ПОДБОР ОПТИМАЛЬНОГО ЗЕРНОВОГО СОСТАВА
ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДОРОЖНОГО БЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

В.В. Белов, М.А. Смирнов
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Белов В.В., Смирнов М.А., 2025

Аннотация. Трудносовместимые требования по высокой пластичности бетонной смеси и высоким эксплуатационным показателям дорожного бетона можно выполнить только на основе научных принципов формирования структуры бетонной матрицы с максимально плотной упаковкой зерен заполнителя, причем с непрерывной гранулометрией, и применением комплекса добавок (микронаполнителей и химических добавок с пластифицирующим и воздухововлекающим (для создания резервной пористости)

действием). Для решения задачи формирования структуры бетонной матрицы с максимально плотной упаковкой зерен заполнителя применялись запатентованные методики и компьютерные программы, разработанные на кафедре производства строительных изделий и конструкций (ПСК) ТвГТУ.

Ключевые слова: армирование на микроуровне, оптимальная гранулометрия, наиплотнейшая упаковка частиц, программное моделирование упаковок.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-12-17

Для получения дорожного бетона с повышенной трещиностойкостью и прочностью необходимо создать особо плотную, монолитную структуру [1, 2]. Этого можно достигнуть при выполнении ряда условий, вытекающих из физических основ структурообразования бетона [3]:

1) применении оптимального количества высокопрочных цемента и дисперсных наполнителей;

2) рациональной гранулометрии и образовании микропластических зон;

3) предельно низком В/Ц соотношении;

4) высоком уровне заполнения внутренних пор в монолите;

5) особо тщательном перемешивании и уплотнении бетонной смеси;

6) создании наиболее благоприятных условий твердения бетона (уход).

Роль модифицирующих добавок и методы их введения описаны в источниках [4, 5]. Процессы структурирования и различные теории твердения бетона приведены в источниках [6–8].

Целью данной работы являлась разработка оптимального состава дорожного бетона с достаточно высокими качественными показателями (БСТ В25 В_{тб}3,6 W8 F₂₀₀ П4), включающего несколько преимущественно местных видов мелкого и крупного заполнителя. При этом в работе ориентировались на применение двух песков с разной крупностью для получения наиболее благоприятной непрерывной гранулометрии: песка Торжокского крупного и песка Старицкого среднего.

В качестве крупного заполнителя были задействованы щебень из гравия фракции 5–20 мм Борисовского месторождения и щебень гранитный месторождения «Большой массив».

В составе бетона использовались дисперсная минеральная добавка (минеральный порошок МП-2) и добавка для бетонов и строительных растворов полифункционального действия «ПФМ-НЛК» (в форме порошка) ООО «Полипласт Новомосковск».

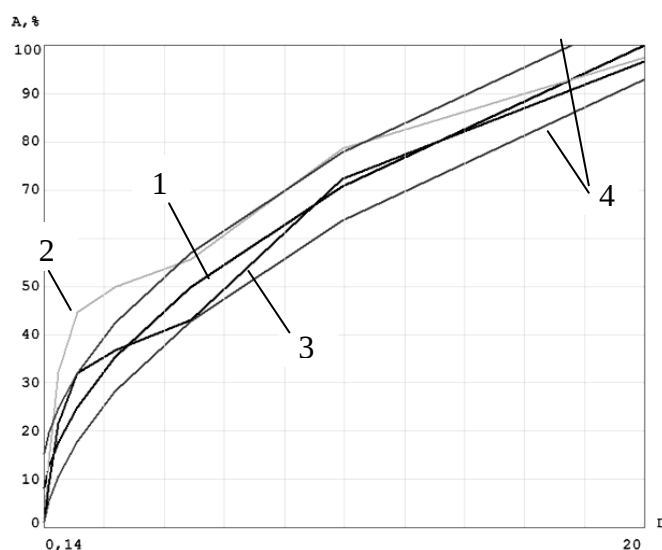
Определение оптимальных зерновых составов смесей заполнителей производилось расчетно-экспериментальным способом. Предварительный расчет оптимальных пропорций компонентов смесей заполнителей производился с помощью разработанной на кафедре ПСК ТвГТУ и запатентованной компьютерной программы (Патент РФ № 2010617267), позволяющей оптимизировать гранулометрический состав зерновой смеси, включающей до ста исходных компонентов с экспериментально определенными заранее зерновыми составами. Метод характеризуется алгоритмом автоматического поиска наилучшего решения, позволяющим уменьшать погрешность вычислений при достижении n -го числа удовлетворительных решений. В математическую основу расчета положено уравнение эталонной кривой Фуллера, которое наиболее точно описывает реальную дисперсную систему с наиболее плотной упаковкой зерен.

Для иллюстрации использования данной компьютерной программы ниже приведены в виде графиков соответствующих гранулометрических составов расчеты

смесей щебня гранитного, песка Старицкого среднего и песка Торжокского крупного (рисунок). Скорректированный состав смеси в массовых долях, %, (оптимальная рецептура, отвечающая минимальному расхождению грансостава смеси с эталоном) оказался равным соответственно: 58,21; 20,53; 21,26.

После компьютерного расчета в диапазоне оптимальных пропорций производилась экспериментальная проверка данного состава путем смешивания сухих компонентов и определения насыпной плотности смесей. По максимуму насыпной плотности судили о наиболее плотной упаковке зерен заполнителя. В основном результаты экспериментальной проверки были близки к расчетным данным. Некоторые отклонения оптимальных пропорций компонентов связаны с отличиями реальной формы зерен заполнителя от шарообразной, положенной в основу компьютерной программы. Поэтому в дальнейших расчетах составов бетона использовались экспериментально уточненные пропорции компонентов.

Ориентировочный состав бетона, рассчитанный по известным методикам, проверялся в лаборатории на опытных замесах объемом 10 дм³. Для этого тщательно перемешивали цемент с сухими навесками песков, минерального порошка и щебня. Растворяли требуемое количество пластификатора в воде затворения и окончательно перемешивали смесь в лабораторном смесителе в течение 3 мин. Затем определяли осадку конуса, которая должна быть в пределах 16–20 см, и в случае необходимости корректировали количество воды и одновременно цемента (с сохранением В/Ц) для получения нужной подвижности. Затем смесь укладывали в предварительно взвешенные формы 10 × 10 × 10 см со штыкованием, после чего их опять взвешивали для определения плотности смеси и фактического расхода компонентов. По такой же методике изготавливали еще два дополнительных состава бетона с варьированием В/Ц $\pm 0,05$.



Графики гранулометрических составов смесей щебня гранитного, песка Старицкого среднего и песка Торжокского крупного: 1 – эталонный по Фуллеру; 2 – исходный для расчета (соответственно 45, 35 и 20 %); 3 – скорректированный, или оптимальный (соответственно 58,21; 20,53; 21,26 %); 4 – границы заданного интервала отклонений от эталонной кривой (7,07 %)

Из указанных смесей формовали образцы бетона в виде кубов с ребром 100 мм для определения плотности, предела прочности на сжатие и водопоглощения.

С целью ускорения процедур подбора предварительных составов бетона образцы для определения свойств пропаривали по режиму 2 ч (подъем температуры) + 8 ч (выдержка при постоянной температуре 65 ± 5 °С) + остывание. Данные режимы твердения практически через сутки позволяют судить о 70%-й прочности бетона в нормативном возрасте (28 сут) и структурных характеристиках (водопоглощении, открытой и закрытой пористости), связанных с важнейшими эксплуатационными параметрами, такими как морозостойкость и водонепроницаемость.

Для определения плотности образцов в сухом состоянии определяли их влажность по фрагментам после их разрушения экспресс-методом на приборе «Элвиз».

В таблице приведены данные по прочности на сжатие и растяжение при изгибе, а также структурным характеристикам бетона и подвижности бетонной смеси для предварительных составов бетона на основе гранитного и Борисовского щебня.

Данные таблицы показывают требуемые прочностные показатели этих составов с учетом 70%-ой марочной прочности при ускоренном твердении, а также благоприятные структурные характеристики (отношение закрытой пористости к открытой для них составляет около 20 %, чего с двукратным запасом достаточно для размещения замерзающей воды в замкнутых порах). Указанная резервная пористость гарантирует необходимые эксплуатационные показатели данных бетонов.

Пределы прочности на сжатие и растяжение при изгибе,
а также структурные характеристики составов бетона на основе гранитного
и Борисовского щебня

Вид крупного заполнителя	Осадка конуса, см	Плотность затвердевшего бетона в сухом состоянии, кг/м ³	Предел прочности на сжатие $R_{сж}$, МПа	Предел прочности при изгибе $R_{изг}$, МПа	Водопоглощение, %	Отношение закрытой пористости к открытой, %
Щебень гранитный	19	2 198	35,1	4,45	6,09	29,6
Щебень Борисовский	17	2 219	43,7	4,05	6,06	19,0

Результаты испытаний контрольных образцов бетона из опытных замесов, полученных в полупроизводственных условиях, показали, что цель данной работы – разработка оптимальных составов бетонной смеси БСТ В25 В_ц3,6 П4 F₂₀₀ W8 на основе двух видов щебня для изготовления дорожного бетона – выполнена. При этом проектные классы бетона по прочности на сжатие превышены на три ступени для бетона на основе гранитного щебня и на пять ступеней для бетона на основе Борисовского щебня. Превышение показателей достигнуто и для прочности на растяжение при изгибе. Это оказалось следствием того, что наиболее критичными параметрами бетона являются требования по морозостойкости и водонепроницаемости, и именно они лимитируют составы бетона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкода Г.Г. Оценка влияния некоторых структурообразующих параметров на прочность сталефибробетона при сжатии // *Технологии бетонов*. 2011. № 3-4 (56-57). С. 27–29.
2. Усиков С.А. Некоторые тенденции в технологии высокопрочных бетонов. *Международный студенческий строительный форум: Сборник докладов в 2 томах*. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. Т. 2. С. 329–334.
3. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л., Гарницкий Ю.В. Расчет состава дорожного цементного бетона с нормированными прочностью и морозостойкостью // *Технологии бетонов*. 2013. № 1 (78). С. 26–29.
4. Савельев А.А., Тарасова А.Ю. Роль модифицирующих волокон в формировании структуры цементного камня // *Технологии бетонов*. 2011. № 11-12 (64-65). С. 50–51.
5. Гусев Б.В., Минсадров И.Н., Мироевский П.В., Трутнев Н.С. Исследование процессов наноструктурирования в мелкозернистых бетонах с добавкой наночастиц диоксида кремния // *Нанотехнологии в строительстве*. 2009. Т. 1. № 3. С. 8–14.
6. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Развитие теории проектирования составов цементного бетона. Часть 1 // *Технологии бетонов*. 2011. № 11-12 (64-65). С. 64–67.
7. Пшеничный Г.Н. О «стадийности» твердения и деструкции цементных систем // *Технологии бетонов*. 2012. № 3-4 (68-69). С. 55–59.
8. Пшеничный Г.Н. Скачкообразность твердения и деструкция цементных бетонов // *Технологии бетонов*. 2011. № 1-2 (54-55). С. 37–42.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

СМИРНОВ Матвей Александрович – 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: matiu.sm@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В., Смирнов М.А. Подбор оптимального зернового состава заполнителей дорожного бетона с использованием компьютерного моделирования // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 4 (28). С. 12–17.

**SELECTION OF OPTIMAL GRAIN COMPOSITION
OF ROAD CONCRETE AGGREGATES
USING COMPUTER SIMULATION**

V.V. Belov, M.A. Smirnov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The difficult-to-reconcile requirements of high plasticity of concrete mixes and high performance of road concrete can only be met by applying scientific principles of forming a concrete matrix structure with the highest possible aggregate grain density, with continuous granulometry, and the use of a complex of additives (microfillers and chemical additives with plasticizing and air-entraining properties (to create reserve porosity)). To achieve this goal of forming a concrete matrix structure with the highest possible aggregate grain density, patented methods and computer programs developed at the Department of Production of Building Materials and Structures (PBS) TvGTU were used.

Keywords: micro level reinforcement, optimal granulometry, tightest particle packing, software package modeling

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

SMIRNOV Matvey Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V., Smirnov M.A. Selection of optimal grain composition of road concrete aggregates using computer simulation // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 12–17.

УДК 691.328

РАЗРАБОТКА САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

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

© Курятников Ю.Ю., 2025

Аннотация. Решение проблемы возникновения трещин в железобетоне возможно при использовании для изготовления изделий и конструкций самовосстанавливающегося бетона. Рассмотрена возможность применения и регулирования аутогенного механизма

самовосстановления бетона. Исследования направлены на то, чтобы усилить этот природный потенциал с помощью специальных добавок, обладающих пуццолановой активностью.

Ключевые слова: самовосстанавливающийся бетон, аутогенный механизм, минеральные добавки, долговечность.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-17-23

Бетон и бетонные смеси являются одними из самых распространенных и популярных материалов, предназначенных для всех видов строительных работ. Без использования бетонных смесей и железобетонных изделий невозможно представить массовое строительство по всему миру. Но, несмотря на грандиозные масштабы применения бетона в строительстве, материал имеет склонность к образованию трещин и повреждений при воздействии на него внешних факторов, из-за чего снижается его долговечность. Основными причинами появления трещин могут быть усадочные деформации, перепад температур окружающей среды, напряжение от внутренних сил, коррозия бетона и арматуры. Таким образом, обеспечение долговечности бетонных (железобетонных) конструкций является одной из главных проблем в строительстве на сегодняшний день.

Решение проблем возникновения трещин возможно при использовании для изготовления изделий и конструкций самовосстанавливающегося бетона. Существует ряд разработок, ориентированных на создание технологических приемов, позволяющих получить материал, который способен к самовосстановлению своей несущей способности в ходе использования [1, 2].

Впервые самовосстанавливающийся бетон был задействован при строительстве спасательной станции на озере в Нидерландах. Позже был построен мост Zeelandbrug, который является одним из самых длинных мостов в Нидерландах и используется для автомобильного и пешеходного движения. Применение самовосстанавливающегося бетона позволило увеличить долговечность мостовой конструкции и снизить затраты на обслуживание. В Токио, столице Японии, технология производства этого бетона реализуется при возведении многоэтажных офисных зданий. В Германии для строительства метрополитена в городе Мюнхене был использован самовосстанавливающийся бетон для заливки тоннелей и подземных станций. В Швеции такой бетон используется для изготовления бетонных конструкций в рамках экологических проектов по восстановлению рек и водоемов. Это позволяет создавать устойчивые к воздействию агрессивных факторов окружающей среды бетонные сооружения [3]. Данные примеры демонстрируют разнообразные области применения самовосстанавливающегося бетона и его успешное использование в различных строительных проектах по всему миру.

Процесс самовосстановления структуры бетона может происходить по следующим механизмам: биологическому и аутогенному (автономному). Биологический механизм с использованием бактерий осуществляется по такому принципу [3, 4]:

1. Лактат кальция вместе с бактериями помещается в капсулы из биоразлагаемого пластика диаметром 2–4 мм.

2. С помощью химически активных добавок эти капсулы внедряются в бетонную смесь.

3. При нормальных условиях использования капсулы сохраняют свою целостность, и бактерии находятся в состоянии анабиоза. Однако при появлении микротрещин структура капсул нарушается, что приводит к попаданию влаги в повреждение и выводит бактерии из анабиоза, активируя их.

4. Затем наступает быстрый рост численности бактерий, потребляющих кальций лактата. Бактерии выделяют известняк как продукт своей жизнедеятельности, который затем заполняет микротрещины.

Процесс восстановления трещины при биологическом механизме представлен на рис 1.

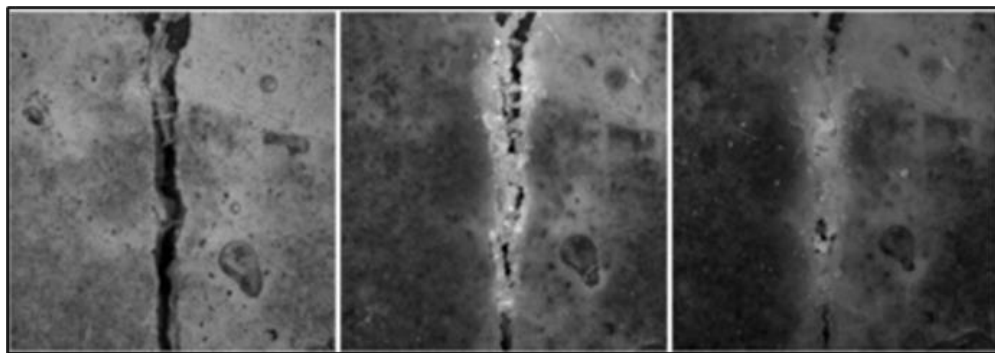
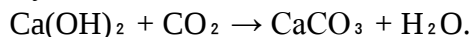


Рис. 1. Процесс восстановления трещины

Аутогенное заживление происходит благодаря продолжающимся химическим и физическим процессам внутри самого бетона в основном за счет двух явлений: гидратации непрореагировавших частиц цемента размером 70 мкм и выше, карбонизации продуктов гидратации [5, 6].

В любом затвердевшем бетоне остается часть цементных частиц, которые не полностью прореагировали с водой (негидратированный цемент). Когда появляется трещина, в нее проникает вода (например, из дождя или влажного воздуха). Эта вода вступает в контакт с непрореагировавшими частицами цемента, и процесс гидратации возобновляется. Вновь образующиеся гидраты (кристаллы) растут и постепенно заполняют полость трещины.

Параллельно протекает процесс карбонизации продуктов гидратации цемента. Углекислый газ CO_2 реагирует с водой, проникшей в трещину, образуя слабую угольную кислоту (H_2CO_3). Эта кислота реагирует с гидроксидом кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) – одним из продуктов гидратации цемента. В результате реакции образуется карбонат кальция (CaCO_3) – нерастворимое соединение, которое осаждается и также закупоривает трещину. Реакция карбонизации имеет следующий вид:



Механизм аутогенного заживления эффективен только для трещин шириной до 0,3 мм. С ростом ширины трещины эффективность резко падает. Процесс невозможен без доступа воды. Циклическое увлажнение и высыхание способствует более интенсивному заживлению. В молодом бетоне больше непрореагировавшего цемента, поэтому его потенциал к самозалечиванию выше. Цементы с более высоким содержанием алита (C_3S) обычно имеют больший потенциал заживления, так как при их гидратации образуется больше гидроксида кальция.

Аутогенный механизм – это врожденная, естественная способность бетона к самовосстановлению, и его сложно контролировать и регулировать. Современные исследования направлены на то, чтобы усилить этот природный потенциал, например, с помощью специальных добавок, увеличивающих количество непрореагировавшего цемента, или путем оптимизации состава бетонной смеси.

В данной работе для усиления аутогенного механизма в состав бетона вводилась комплексная органо-минеральная добавка: молотый доменный шлак / высокоактивный метакраун ВМК-45, сульфаталюминатная добавка, расширяющая добавка (РД) и суперпластификатор Readi-mix RM-304. Для проверки данной гипотезы были изготовлены бетоны разных составов вяжущей части (таблица).

Составы вяжущей части самовосстанавливающихся бетонов

№ п/п	Вяжущая часть, %				Вяжущая часть / песок по массе
	Цемент	Шлак	ВМК	РД	
1	90	—	—	10	1:2,5
2	80	10	—	10	1:2,5
3	70	20	—	10	1:2,5
4	60	30	—	10	1:2,5
5	50	40	—	10	1:2,5
6	85	—	5	10	1:2,5
7	80	—	10	10	1:2,5
8	75	—	15	10	1:2,5

В результате эксперимента были установлены зависимости предела прочности на сжатие, предела прочности на растяжение при изгибе, коэффициента трещиностойкости, коэффициента размягчения от содержания вышеуказанных компонентов вяжущей части бетона.

Исследования способности бетона к самовосстановлению проводились на образцах мелкозернистого бетона размером 10 x 10 x 10 см. Образцы разных составов твердели в нормальных условиях в течение 28 сут. Затем на образцах были получены трещины шириной до 0,2 мм путем нагружения под прессом. Нагрузка подбиралась экспериментально до появления первых трещин. Ширину трещин измеряли щупом (ГОСТ 882) в наиболее широком месте и маркировали. После этого образцы помещали в камеру нормального твердения (температура 20 ± 2 °С, влажность 95–100 %) и каждые 7 сут измеряли ширину маркированных трещин. Испытание продолжалось до тех пор, пока трещины не закрылись. Оптимальный состав, на котором трещины закрылись в течение 28–56 сут соответствует 10 % ВМК и 10 % РД (рис. 2).



Рис. 2. Процесс восстановления трещины с добавкой ВМК

Механизм гидратации цемента с молотым доменным шлаком – это синергетический процесс, в котором портландцементный клинкер выполняет роль каталитического активатора, создавая щелочные условия для раскрытия вяжущего потенциала шлака. Под действием щелочи стекловидная структура шлака разрушается. В результате гидратации смешанного цемента образуются гидросиликаты кальция (C-S-H) и гидрогранаты ($C_3AS_xH_{6-2x}$), происходит снижение количества $Ca(OH)_2$ за счет пуццолановых реакций. C-S-H фаза, образующаяся из шлака, часто имеет более низкое соотношение Ca/Si, чем C-S-H из чистого клинкера. Такая фаза имеет более мелкопористую структуру, которая уплотняет матрицу цементного камня и обладает повышенной стойкостью к химическим агрессиям.

Механизм гидратации цемента с добавкой высокоактивного метакеолина (ВМК) – это сложный процесс синергетического взаимодействия, который кардинально меняет микроструктуру и свойства цементного камня. ВМК ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) – аморфный продукт, полученный путем кальцинации каолинита. Реакции между компонентами цементного камня и ВМК протекают быстрее, чем при использовании доменного шлака. Высокая активность ВМК обусловлена большой удельной поверхностью и разрушенной кристаллической решеткой.

В первую очередь при затворении водой портландцемента с указанными активными минеральными добавками гидратируется его клинкерная часть с наиболее мелкими зернами. Во вторую очередь в результате гидратации и гидролиза клинкерных минералов раствор насыщается гидроксидом кальция, который взаимодействует с алюминатной и силикатной составляющими шлака или метакеолина, действуя на них как щелочной активатор, благодаря чему происходят гидролиз и гидратация шлаковой составляющей цемента или метакеолина с образованием гидроалюминатов, гидросиликатов кальция и их смесей различного состава.

Пуццолановая реакция между шлаковыми или метакеолиновыми составляющими и гидроксидом кальция цемента может протекать длительное время (годами), продолжая увеличивать плотность и прочность. В третью очередь гидратируются на протяжении десятилетий крупные клинкерные зерна размером более 80 мкм, прореагировав с водой за это время на незначительную глубину.

Таким образом, в процессе эксплуатации изделия гидроалюминаты, гидросиликаты кальция и их смеси различного состава будут заполнять объем появляющихся трещин в бетоне при выполнении следующих условий, а именно при наличии:

воды в трещинах в достаточном количестве для «вторичного запуска» процесса гидратации;

гидроксида кальция, образующегося при поздней гидратации «крупных» зерен клинкера;

алюминатной и силикатной составляющих шлака или метакеолина;

сульфоалюминатной расширяющейся добавки РД-Н. Расширяющая добавка (РД-Н) – это тонкоизмельченная смесь, состоящая из сульфалюминатных и сульфатных компонентов. Добавка будет действовать на стекловидную составляющую шлаков как дополнительный активатор гидратации и твердения (сульфатная активизация).

положительной температуре воздуха. Повышение температуры приведет к ускорению самовосстановления бетона из-за ускорения реакции гидратации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жукова Г.Г., Сайфулина А.И. Исследование применения самовосстанавливающегося бетона // *Construction and Geotechnics*. 2020. Т. 11. № 4. С. 58–68.
2. Кодзоев М.Х., Исаченко С.Л. Самовосстанавливающийся бетон // *Бюллетень науки и практики*. 2018. Т. 4. № 4. С. 287–290.
3. De Belie N., Gruyaert E., Al-Tabbaa A [et al.]. Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures // *Advanced Materials Interfaces*. 2018. No. 5 (17), pp.152–160.
4. Асонова А.В. Новый взгляд на бетон. Самовосстанавливающийся гибкий бетон. *IX Всероссийский фестиваль науки: Сборник докладов в 2 томах*. Нижний Новгород: НГАСУ. 2020. Т. 1. С. 16–18.
5. Hearn N., Morley C.T. Self-sealing property of concrete – Experimental evidence // *Materials and Structures*. 1997. Vol. 30, pp. 404–411.
6. Self-Healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications / Ed. S.K. Ghosh. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. 291 p.

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. Разработка самовосстанавливающегося бетона // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 4 (28). С. 17–23.

DEVELOPMENT OF SELF-REPAIRING CONCRETE

Yu.Yu. Kuryatnikov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The problem of cracks in reinforced concrete can be solved by using self-healing concrete for the production of products and structures. The possibility of using and

regulating the autogenous mechanism of self-healing in concrete has been considered. Research is aimed at enhancing this natural potential using special additives with pozzolanic activity.

Keywords: self-healing concrete, autogenous mechanism, mineral additives, and durability.

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. Development of self-repairing concrete // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 17–23.

УДК 697.92

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ УСТРОЙСТВА ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ В ОДНОКВАРТИРНОМ ЖИЛОМ ДОМЕ ПЛОЩАДЬЮ ДО 150 М²

А.В. Левиков

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Левиков А.В., 2025

Аннотация. В статье проанализированы проектные решения устройства принудительной вентиляции для жилого дома заданной планировочной схемы с использованием приточно-вытяжной вентиляции и приточных клапанов в стенах. Выявлены недостатки и достоинства каждого проектного решения, в частности отмечены существенные сложности применения приточно-вытяжных установок в домах площадью до 150 м². Представлены проектные рекомендации для независимой настройки системы вентиляции в каждом отдельном помещении.

Ключевые слова: вентиляция, естественная вентиляция, принудительная вентиляция, приточно-вытяжная вентиляция, вентиляционный клапан.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-23-27

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия человек большую часть времени проводит в помещениях [1]. Условия внутреннего микроклимата помещения все больше заменяют природные. Параметры этого микроклимата нормируются ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» и включают в себя влажность воздуха, его подвижность и температуру. Обеспечение данных параметров достигается, в частности, за счет организации системы вентиляции: естественной или принудительной.

Система вентиляции должна гарантировать подачу свежего воздуха в помещения и удаление отработанного загрязненного воздуха в полном объеме.

Естественная вентиляция не может на постоянной основе поддерживать требуемые параметры микроклимата [2] из-за нестабильного атмосферного давления и движения воздушных масс, инсоляции, ориентации помещений по сторонам света, сложного расчета сечений каналов и монтажа. Грамотно спроектированная система вентиляции не подразумевает получения свежего воздуха через открывание оконных блоков, как предусматривается при естественной вентиляции. Тем более открытые окна зачастую снижают комфорт нахождения внутри помещений из-за шума и резкого перепада температур, особенно в холодный период года. Для бесперебойного обеспечения параметров микроклимата необходимо рационально использовать принудительную приточно-вытяжную вентиляцию, однако на сегодняшний день нет единственно правильного готового технического решения, эффективного и экономически обоснованного, для квартир и отдельных зданий сравнительно небольшой площади. Рекуперация показывает свою эффективность только в промышленных масштабах [3].

АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

Рассмотрим и сравним два проектных решения комплексного устройства приточно-вытяжной вентиляции, представленных на рис. 1 и 2, для одной и той же планировочной схемы одноэтажного дома.

В первом проектном решении (рис. 1) применяется приточно-вытяжная установка производительностью 350 м³/ч, имеющая форму параллелепипеда со сторонами 105 x 95 см и высотой 40 см. Согласно паспорту прибора, «шум к окружению» с применением шумоглушителей на расстоянии 2 м от корпуса оборудования составляет 50 дБ, что требует обязательного расположения установки в отдельном техническом помещении.

Для минимизации шума вентиляционных труб, выходящих из приточно-вытяжной установки, требуется монтаж шумоглушителя и прямолинейного участка успокоения воздуха длиной не менее 4 м (а в некоторых случаях блока увлажнения воздуха, испарителя и т.п.), что практически невозможно реализовать в многоквартирных жилых домах площадью до 150 м² из-за нерентабельности устройства технических помещений площадью более 6 м². Как видно на схеме, сразу после подключения приточно-вытяжной установки выполнены повороты труб для их компоновки. Подобная компоновка труб создает канальный шум на уровне 50 дБ, значительно снижая уровень комфорта помещений в доме.

Подающие каналы свежего воздуха в помещения имеют суммарную длину 23 м, системы фильтрации не смогут в полной мере устранить все частички пыли, и со временем в воздуховодах будет оседать мелкодисперсная пыль. Необходима регулярная санация подающих вентиляционных каналов.

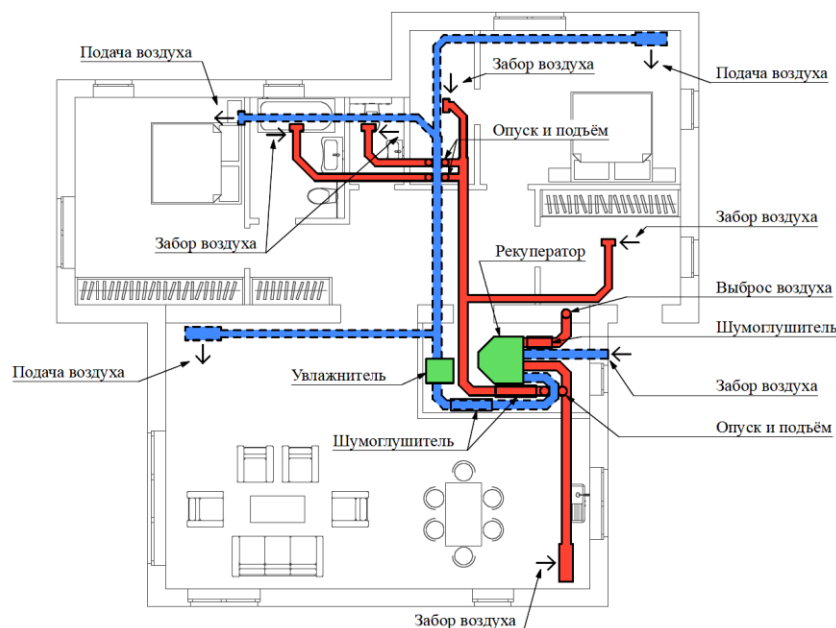


Рис. 1. Проектное решение устройства вентиляции одноквартирного жилого дома с применением приточно-вытяжной установки

Для обеспечения требуемых параметров микроклимата приточно-вентиляционная установка должна быть всегда в рабочем состоянии, она не способна отслеживать качество воздуха и наличие или отсутствие людей в каждом отдельном помещении. Из-за группировки приточных и вытяжных каналов в одну конечную трубу и отсутствия гибкой настройки системы воздух вентилируется сразу во всем доме.

Во втором проектном решении (рис. 2) реализована иная концепция устройства приточно-вытяжной вентиляции. Непрерывная подача воздуха осуществляется через индивидуальные приточные клапаны с максимально коротким каналом [4]. Удаление воздуха выполнено через индивидуальные каналы до места централизованного выброса за пределы дома. Система в режиме ожидания работает на минимальной мощности, не создавая значимого шума и предотвращая застаивание воздуха. Изменение мощности работы каждого вентиляционного канала возможно за счет установки канального клапана и вентилятора. В каждом индивидуальном вытяжном канале находятся датчики влажности, углекислого газа и объема органических примесей, которые реагируют на изменение параметров воздуха и меняют мощность работы системы вентиляции в каждом отдельно взятом помещении, что в итоге экономит потребление электроэнергии по сравнению с первым рассмотренным вариантом.

Из основных недостатков данной схемы отметим снижение комфорта в зимний период года из-за поступления холодного воздуха через клапаны в стенах [5]. Обеспечение комфортной температуры в зимний период должно достигаться за счет мощности системы отопления.

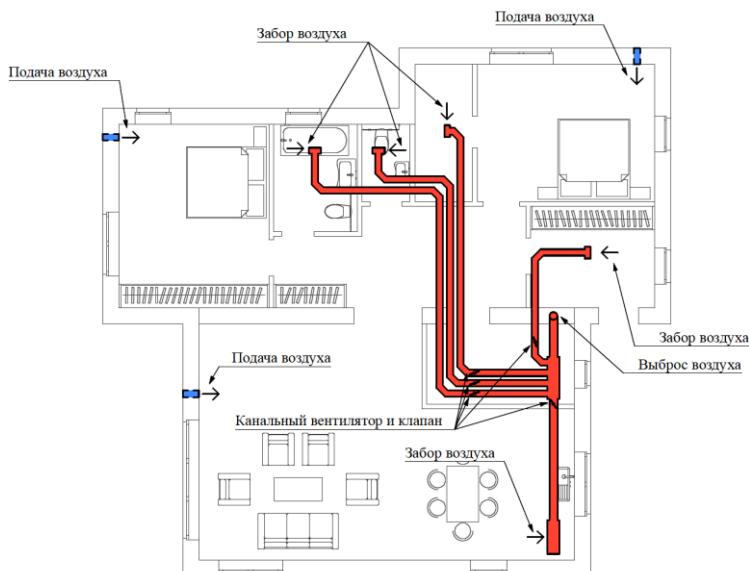


Рис. 2. Проектное решение устройства вентиляции одноквартирного жилого дома с применением индивидуальных приточных клапанов и вытяжных каналов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обеспечение требуемых параметров микроклимата воздуха (температуры, влажности и подвижности) в помещениях одноквартирного жилого дома на постоянной основе возможно только за счет устройства принудительной приточно-вытяжной вентиляции без использования окон для притока. Вентиляция с естественным побуждением воздуха не способна круглогодично обеспечивать требуемые параметры внутри помещений.

Проектное решение с применением приточно-вытяжной установки целесообразно в промышленных объемах и имеет ряд существенных недостатков для небольших зданий: 1) из-за шума установки более 50 дБ ее размещение возможно только в обособленном техническом помещении не смежном с жилыми комнатами; 2) корректная обвязка вентиляционных труб требует наличия прямого участка не менее 4 м, который нерационально выделять в техническом помещении в домах площадью до 150 м²; 3) необходима регулярная санация приточных вентиляционных каналов.

Проектное решение с использованием индивидуальных приточных клапанов и вытяжных каналов решает вышеперечисленные недостатки приточно-вытяжной установки, позволяет создать гибкую настройку режимов работы вентиляции для экономии энергопотребления, является простым в обслуживании, однако в холодный период года чувствительно к мощности системы отопления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гульбинас А.С., Литвинова Н.А. Определение понятия «микроклимат» помещения с использованием системно-категориального подхода // *Вестник Евразийской науки*. 2021. Т. 13. № 5. URL: <https://esj.today/PDF/15SAVN521.pdf> (дата обращения: 15.09.2025).
2. Сарафанова Ю.В. Естественная вентиляция жилых зданий // *Вестник магистратуры*. 2020. №2-2 (101). С. 60–66.
3. Антонова, Е.О., Юрченко А.С. Применение приточно-вытяжных установок в системах вентиляции жилых зданий. *Современные проблемы энергетики: Материалы*

I Национальной научно-практической конференции / отв. ред. А.В. Воронин. Тюмень: Тюменский индустриальный университет. 2022. С. 70–72.

3. Краснобаев М.А., Суханов М.А. Вентиляция жилых многоквартирных домов с помощью приточных клапанов // *Вестник магистратуры*. 2022. № 4-4 (127). С. 27–29.

4. Нуруллин Н.Ж., Ваньков Ю.В. Анализ работы систем приточно-вытяжной вентиляции в разных климатических условиях. *Economic aspects of industrial development in the transition to a digital economy: Сборник научных статей по материалам III Международной научно-практической конференции* / отв. ред. А.Р. Халиков. Уфа: НИЦ «Вестник науки», 2020. С. 43–51.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ЛЕВИКОВ Александр Валерьевич – кандидат философских наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: leviksa@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Левиков А.В. Обоснование оптимального проектного решения устройства приточно-вытяжной вентиляции в многоквартирном жилом доме площадью до 150 м² // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 4 (28). С. 23–27.

JUSTIFICATION OF THE OPTIMAL DESIGN SOLUTION FOR THE INSTALLATION OF SUPPLY AND EXHAUST VENTILATION IN A SINGLE-APARTMENT RESIDENTIAL BUILDING WITH AN AREA OF UP TO 150 M²

A.V. Levikov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article analyzes the design solutions for the forced ventilation device for a residential building of a given layout using supply and exhaust ventilation and supply valves in the walls. The shortcomings and advantages of each design solution were revealed, in particular, significant difficulties in the use of plenum and exhaust plants in houses with an area of up to 150 m². Proposed design recommendations for independent adjustment of the ventilation system in each individual room.

Keywords: ventilation, natural ventilation, forced ventilation, supply and exhaust ventilation, ventilation valve.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

LEVIKOV Alexander Valeryevich – Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: leviksa@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Levikov A.V. Justification of the optimal design solution for the installation of supply and exhaust ventilation in a single-apartment residential building with an area of up to 150 m² // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2024. No. 3 (23), pp. 23–27.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.396.6.001.66

**МОДЕЛИ ПАРАЗИТНЫХ АНТЕНН В УЗЛАХ ОБОРУДОВАНИЯ
КЛЮЧЕВЫХ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ
С УЧЕТОМ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ****Д.В. Комнатный***Гомельский государственный технический университет им П.О. Сухого
(Республика Беларусь, г. Гомель)*

© Комнатный Д.В., 2025

Аннотация. Рассматриваются модели паразитных антенн в узлах микро-электронной аппаратуры ключевых систем информационной инфраструктуры. Для расчета восприимчивости к электромагнитным помехам применяется метод передаточных функций. Описаны резонансные и аналогичные резонансным режимы в электрически малых антеннах, модели которых представляют собой цепи со сосредоточенными параметрами. Для моделей паразитных антенн в виде цепей с распределенными параметрами получено выражение для передаточной функции и выявлены режимы в нагрузке, аналогичные резонансным. Рассмотрен способ исследования перечисленных режимов при испытаниях аппаратуры на устойчивость к электромагнитным помехам. Анализ резонансных режимов работы паразитных антенн дает возможность исключить ухудшение электромагнитной совместимости микроэлектронной аппаратуры.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, импульсные помехи, паразитные антенны, резонанс, полоса пропускания, электрически малые антенны, цепи с распределенными параметрами, испытательные импульсы.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-28-35**ВВЕДЕНИЕ**

Современные условия придают особое значение проблеме воздействия импульсных помех на микроэлектронную и микропроцессорную аппаратуру ключевых систем информационной инфраструктуры (в Республике Беларусь – критически важных объектов информатизации). Это объясняется снижением помехоустойчивости современной элементной базы, ростом числа источников электромагнитных помех, расширением полосы частот спектра данных помех. Немаловажным обстоятельством является и то, что в числе импульсных помех имеются электромагнитные импульсы, создаваемые преднамеренно с вредоносными целями (электромагнитные импульсы преднамеренного воздействия (ЭИПВ)) [1].

При воздействии некондуктивных импульсных помех конструкция аппаратуры ключевых систем информационной инфраструктуры рассматривается как сложная система паразитных антенн [2]. Для обеспечения требуемой помехоустойчивости оборудования такие антенны, в отличие от штатных антенн радиоэлектронных средств, должны быть

минимально эффективны по восприимчивости. Но паразитная антенна может непреднамеренно заработать в резонансном режиме. В этом случае эффективность приема антенной электромагнитных помех становится максимальной. Соответственно, недопустимо ухудшается электромагнитная совместимость микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры, целостность полезного сигнала и целостность электропитания [3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для анализа и прогнозирования восприимчивости электронного оборудования к импульсным электромагнитным помехам в источнике [4] предложен метод передаточных функций. Передаточная функция рецептора имеет вид

$$K(j\omega) = \frac{U_{out}(j\omega)}{E_{in}(j\omega)}, \quad (1)$$

где ω – круговая частота, рад/с; U_{out} – выходное напряжение, В; E_{in} – входная напряженность электромагнитного поля, В/м.

По известной передаточной функции рассчитывается напряжение помех, наведенное в антенне электромагнитным полем. Эффективность воздействия по энергии определяется формулой

$$\eta_w = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} U_{out}^2(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} U_{out}^2(\omega) d\omega}, \quad (2)$$

где ω_1, ω_2 – граничные круговые частоты полосы пропускания, рад/с.

Из (1) и (2) следует, что для осуществления анализа восприимчивости паразитной антенны требуется определить ее передаточную функцию и найти верхнюю и нижнюю частоты полосы пропускания. Для решения этой задачи следует рассмотреть электродинамические модели паразитных антенн. Такое рассмотрение и осуществляется в статье.

МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ КОРОТКИХ АНТЕНН

В источнике [5] описываются паразитные антенны, которые допустимо считать электрически малыми. Для их анализа применяются квазистатический подход и модели в виде схем замещения из сосредоточенных элементов. Анализ схем замещения легко выполнить методами теории цепей [3].

В таблице приведены модели антенн, схемы замещения, указана возможность резонансного или аналогичного резонансному режима. Таблица составлена по источникам [5–7].

Передаточная функция (1) для моделей в виде последовательной RLC -цепи получается из амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) этой цепи, которая имеет вид классической резонансной кривой для резонанса напряжений [8, 9]. Таким образом, выявляется резонансный режим работы антенны.

Для моделей в виде смешанной RLC -цепи схема замещения может быть преобразована в последовательную RLC -цепь [10].

Модели электрически коротких паразитных антенн

Модель антенны	Схема замещения	Резонансный режим
Несимметричный вибратор	Последовательная RC -цепь	Невозможен
НЧ резонансный вибратор	Последовательная RLC -цепь	Резонанс напряжений
Пластиначная дипольная	Смешанная RC -цепь	Псевдорезонанс
Рамочный квазистатический виток	Последовательная RL -цепь	Невозможен
НЧ резонансный виток	Смешанная RLC -цепь	Резонанс напряжений
Емкостная шлейфовая	Смешанная RLC -цепь	Резонанс напряжений
Т-образная индуктивная	Смешанная RLC -цепь	Резонанс напряжений

Полоса пропускания последовательной RLC -цепи, соответствующей паразитной антенне, должна рассчитываться с учетом добротности, которая определяет избирательность антенны и значение максимума АЧХ. Так как паразитные антенны непреднамеренно имеют и высокую и низкую добротность, то граничные частоты полосы пропускания определяются по общей формуле [9]

$$f_{1,2} = f_0 \left(-1 \mp \frac{1}{2Q} + \sqrt{1 + \frac{1}{4Q^2}} \right), \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3)$$

где $f_{1,2}$ – граничные частоты, Гц; f_0 – собственная частота, Гц; Q – добротность; L – индуктивность антенны, Гн; C – емкость антенны, Ф.

Передаточная функция для модели в виде смешанной RC -цепи аналогично получается из АЧХ цепи [5]. В этом же источнике указана формула для граничных частот полосы пропускания антенны. АЧХ этой цепи учитывает режим псевдорезонанса.

Таким образом, в моделях паразитных антенн в виде цепей с сосредоточенными параметрами резонансные и аналогичные им режимы заложены изначально и выявляются непосредственно. Следовательно, имеется возможность анализа восприимчивости таких антенн с учетом резонансных режимов.

МОДЕЛИ В ВИДЕ ЦЕПИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В источнике [5] указано, что модели в виде цепи с сосредоточенными параметрами оказываются недостаточными для воздействия импульсов с очень короткими наносекундными фронтами. Такими импульсами являются электростатические разряды, и ЭИПВ с узкой и средней полосами частот по классификации стандарта IEC61000-4-36, и, в меньшей степени, наводки от соседних линий быстродействующих цифровых узлов. Для рассмотрения воздействия этих помех используются модели в виде нагруженных идеальных длинных линий [6, 11, 12].

В этих моделях принимают, что расстояние между проводниками линии мало, поэтому линии являются электрически короткими по зазору между проводниками. В зависимости от длины проводников линия с распределенными параметрами может быть электрически короткой и электрически длинной по длине проводников.

В источниках [6, 11] приведены модели паразитных антенн в виде электрически коротких линий по длине проводников, а также формулы для расчета помех в нагрузках этих линий. Из этих формул следует, что резонансные режимы в электрически коротких по длине линиях невозможны. Воздействие электромагнитных излучений на электрически длинные линии с позиции электромагнитной совместимости исследовалось в источниках [12, 13]. Но в них не рассматривались подробно процессы в нагрузках линий и не выявлялись резонансные режимы. В руководствах по теории электрических цепей [14], как

правило, рассматриваются распределения напряжения и тока по длине идеальной линии, выявляются точки резонанса.

Для применения метода передаточных функций к моделям в виде длинных линий требуется получить выражение передаточной функции, связывающей характеристики поля помех и напряжение в нагрузках на концах линии. Линии связи печатных микро-электронных узлов зачастую согласовываются с нагрузками для снижения помех, возникающих из-за отражений электромагнитных волн от нагрузок [12]. Кроме того, при согласованной нагрузке в нее поступает вся подводимая энергия, таким образом, воздействие помех становится опаснее. По источникам [11, 12] возможны два типа поляризации некондуктивных помех. Первый тип: вектор напряженности магнитного поля перпендикулярен плоскости линии, вектор напряженности электрического поля параллелен плоскости линии. Второй тип: вектор напряженности магнитного поля параллелен плоскости линии, а вектор напряженности электрического поля перпендикулярен плоскости линии.

При первом типе поляризации воздействие некондуктивных помех на линию моделируется распределенным генератором [11] и выражается формулой

$$\underline{E}(z) = j\omega\mu_0 H(j\omega)sl, \quad (4)$$

где E – ЭДС генератора, В; z – координата точки на линии, м; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; H – напряженность магнитного поля А/м; s – длина зазора, м; l – длина линии, м.

Определение напряжения в нагрузках производится по общим формулам для расчета воздействия некондуктивных помех на длинную линию [13]. Для согласованной идеальной линии эти формулы принимают вид:

$$\underline{U}(z) = Z_B \left(P_e(z) e^{-\gamma l} + Q_e(z) e^{\gamma l} \right),$$

$$P_e(z) = \frac{1}{2Z_B} \int_{z_1}^z E(v) e^{\gamma v} dv; \quad Q_e(z) = \frac{1}{2Z_B} \int_z^{z_2} E(v) e^{-\gamma v} dv, \quad (5)$$

где U – напряжение в точке на линии, В; $Z_B = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – волновое сопротивление;

$\gamma = j\omega\sqrt{LC} = j\beta$ – постоянная распространения; z_1, z_2 – координаты начала и конца линии, м; L – погонная индуктивность линии, Гн/м; C – погонная емкость линии, Ф/м; v – вспомогательная переменная..

На рис. 1 показана принятая аналогично источнику [12] система координат. Тогда $z_1 = -l/2, z_2 = +l/2$.

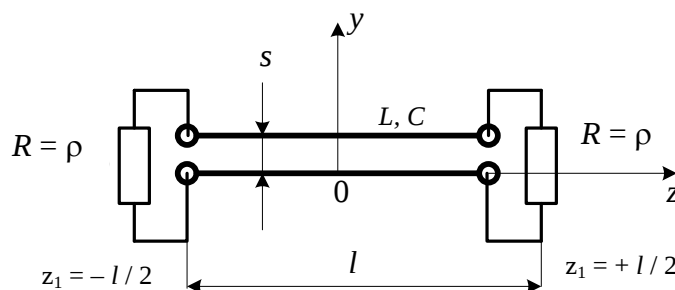


Рис. 1. Система координат модели в виде цепи с распределенными параметрами

Тогда после подстановки (4) в (5) и интегрирования с учетом координат начала и конца линии получено выражение для напряжений в нагрузках начала и конца линии

$$\underline{U}\left(-\frac{l}{2}\right) = \underline{U}\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{\mu_0 s l \underline{H}(j\omega)}{2L} Z_B (1 - e^{-\gamma l}). \quad (6)$$

Из (6) следует выражение для передаточных функций для напряжения помех

$$\underline{K}_{1,2}(j\omega) = \frac{\underline{U}_{1,2}(j\omega)}{\underline{H}(j\omega)} = \frac{\mu_0 s l}{2L} Z_B (1 - e^{-\gamma l}). \quad (7)$$

Модуль передаточной функции (7) с учетом выражения для постоянной распространения имеет вид

$$K_{1,2}(\omega) = \frac{\mu_0 s l}{2L} Z_B \sqrt{2} \sqrt{1 - \cos \omega l \sqrt{LC}}. \quad (8)$$

Исследование функции $\sqrt{2} \sqrt{1 - \cos x}$, где $x = \omega l \sqrt{LC}$, показывает, что эта функция является периодической. Она имеет максимум при $\cos x = -1$, т.е. при $\omega = \frac{(2l+1)\pi}{l\sqrt{LC}}$.

Максимальное значение функции равняется 2. На этих частотах в нагрузках линии имеется максимум напряжения, поэтому данный режим является аналогом резонансного.

Тогда для определения полосы пропускания допустимо, по аналогии с резонансом напряжений в последовательной RLC -цепи, полагать, что на границе полосы пропускания

$$\sqrt{2} \sqrt{1 - \cos \omega l \sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Тогда граничные частоты полос пропускания

$$\omega_1 = \frac{\arccos \frac{3}{4} + \pi n}{l\sqrt{LC}}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

$$\omega_2 = \frac{n\pi - \arccos \frac{3}{4}}{l\sqrt{LC}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

Аналогично может быть исследован второй тип поляризации некондуктивной помехи.

В случае длинной линии с несогласованной нагрузкой расчет воздействия помех на нее усложняется в связи с необходимостью учета отражений электромагнитных волн от концов линии. Расчетные соотношения из источника [13] для этого случая имеют громоздкий вид, поэтому получить замкнутые выражения для передаточных функций затруднительно.

ПРОВЕРКА УСТОЙЧИВОСТИ АППАРАТУРЫ В РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМАХ

Так как резонансные и аналогичные им режимы вызывают недопустимое ухудшение электромагнитной совместимости микроэлектронной аппаратуры, то необходимо проверять эти режимы на этапе испытаний. Одним из способов является воздействие импульсами, которые имеют максимум спектральной характеристики на частоте, равной частоте резонансного режима.

Для электрически малых антенн могут использоваться импульсы в виде затухающей синусоиды, косинусный радиоимпульс, радиоимпульс с колоколообразной огибающей. Спектральные характеристики этих импульсов имеют максимум на частоте, не равной 0 [15].

Для антенн, моделируемых длинными линиями, целесообразно производить тестирование суммой импульсов в виде затухающей синусоиды. Параметры импульсов подобраны так, чтобы частоты максимума спектральной характеристики совпадали с частотами максимумов напряжений в нагрузках [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По приведенным в статье результатам можно сделать следующие выводы.

Модели паразитных антенн позволяют выявлять резонансные и аналогичные им режимы работы антенн и осуществлять анализ восприимчивости узлов микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры к импульсным электромагнитным помехам. Это справедливо как для моделей в виде цепей с сосредоточенными параметрами, так и для моделей в виде цепей с распределенными параметрами.

При использовании метода передаточных функций функции цепей с сосредоточенными параметрами получаются из известных соотношений для АЧХ цепей. Для моделей в виде идеальной длинной линии в статье получены и проанализированы передаточные функции для напряжения на нагрузках. В существующих публикациях этот вопрос исследован недостаточно, несмотря на его высокую актуальность.

Анализ резонансных и аналогичных им режимов позволяет выбрать форму и параметры импульсов испытательных воздействий, с помощью которых можно установить восприимчивость микроэлектронной аппаратуры при наличии указанных режимов во время испытаний. Таким образом, повышается адекватность испытаний.

Как следует из источника [3] анализ электромагнитной совместимости современной микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры, в котором учитывается негативное влияние резонансных режимов, является востребованным. Несмотря на то, что модели паразитных антенн предложены достаточно давно, выявление резонансных и аналогичных режимов в них проводилось мало. Следовательно, представленное в статье рассмотрение представляет теоретический интерес и полезно для проектирования аппаратуры ключевых систем информационной инфраструктуры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает искреннюю благодарность д.т.н., профессору К. А. Бочкову за полезные обсуждения, позволившие сформулировать цель исследования и выбрать методы его проведения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кечиев Л.Н. Электромагнитная несовместимость: опасности, катастрофы, риски. Инженерное пособие. М.: Грифон, 2022. 544 с.
2. Прищепенко А.Б. Взрывы и волны. Взрывные источники электромагнитного излучения радиочастотного диапазона. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 208 с.
3. Кечиев Л.Н. Электрофизические основы конструирования электронной аппаратуры. Инженерное пособие. М.: Грифон, 2020. 480 с.
4. Mojert C., Nitsch D., Friedhoff H., Maack J., Sabath F., Camp M., Garbe H. UMB and EMP Susceptibility of Microprocessors and Networks // *Proceedings of 14th International Zurich Symposium on EMC. February, 20–22. Switzerland: Zurich.* 2021. pp. 47–52.
5. Электротехническая совместимость электрооборудования подвижных технических систем / Болдырев В.Г. [и др.] / под ред. В.П. Булекова. М.: Энергоатомиздат, 1993, 352 с.
6. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / под ред. В.И. Кравченко, М.: Радио и связь, 1987. 256 с.

7. Кравченко В. И. Грозозащита радиоэлектронных средств: справочник. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.
8. Каплянский А.Е., Лысенко А.П., Полотовский Л.С. Теоретические основы электротехники: учебное пособие / под ред. А.Е. Каплянского. Изд. 2-е. М.: Высшая школа, 1972. 448 с.
9. Атабеков Г. И. Основы теории цепей: учебник для вузов. М.: Энергия, 1969. 424 с.
10. Справочное пособие по электротехнике и основам электроники: учебное пособие / П. В. Ермуратский, А.А. Косякин, В.С. Листвин [и др.] / под ред. А. В. Нетушила. М.: Высшая школа, 1986. 248 с.
11. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО Группа «ИДТ», 2007. 616 с.
12. Геворкян В.М. Электромагнитная совместимость электронных информационных систем: в 2 ч. Ч. 1. Общие вопросы электромагнитной совместимости технических средств М.: Изд. дом МЭИ, 2022. 421 с.
13. Аполлонский С.М., Горский А.Н. Расчеты электромагнитных полей: монография / под ред. А.Н. Горского. М.: Маршрут, 2006. 992 с.
14. Афанасьев Б.П., Гольдин О.Е., Кляцкин И.Г., Пинес Г.Я. Теория линейных цепей: учебное пособие. М.: Высшая школа, 1973. 592 с.
15. Крылов Н.Н. Теоретические основы радиотехники. М.: Морской транспорт, 1953. 552 с.
16. Carter N. J. The Revision of EMC Specifications for Military Aircraft Equipment. Philosophy Doctoral Thesis. Guildford: University of Surrey, 1985. 178 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КОМНАТНЫЙ Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники, УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого», 246746, Республика Беларусь, г. Гомель, просп. Октября, 48. E-mail: toe4031@gstu.by

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Комнатный Д.В. Модели паразитных антенн в узлах оборудования ключевых систем информационной инфраструктуры с учетом резонансных режимов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 4 (28). С. 28–35.

THE MODELS OF PARASITIC ANTENNAS IN UNITS OF KEY SYSTEMS OF INFORMATION INFRASTRUCTURE TAKING INTO ACCOUNT RESONANCE REGIMES

D.V. Komnatny

*Gomel State Technical University named by P.O.Sukhoy
(Belarus Republic, Gomel)*

Abstract. The model of parasitic antennas in units of key systems of information infrastructure microelectronic apparatus is considered. The transfer functions method is used for electromagnetic noise susceptibility calculation. The resonance regimes and analogous to resonance regimes in electrically small antennas, which models are presented lumped-parameter

circuits, are described. The transfer function expression for parasitic antennas with models in the form of distributed parameter circuits is obtained and regimes, analogous to resonance in loads are exposed. The method of enumerated regimes investigation during apparatus testing for stability to electromagnetic noise is discussed. The analysis of resonance regimes in parasitic antennas give the possibility to exclude the worsening of microelectronic apparatus electromagnetic compatibility.

Keywords: electromagnetic compatibility, impulse noise, parasitic antennas, resonance regime, bandwidth, electrically small antennas, distributed parameters circuit, test impulses.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KOMNATNY Dmitry Victorovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department theoretical foundations of electrical engineering, Gomel State Technical University named by P.O. Sukhoy, 48 October avenue, Gomel, 246746, Belarus Republic. E-mail: toe4031@gstu.by

CITATION FOR AN ARTICLE

Komnatny D.V. The models of parasitic antennas in units of key systems of information infrastructure taking into account resonance regimes // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2025. No. 4 (28), pp. 28–35.

УДК 621.311:004.89

МЕТОДЫ ОБЪЯСНИМОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

М.А. Куликова, Я.А. Чеботарев, О.Н. Торгованова, К.Б. Корнеев
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Куликова М.А., Чеботарев Я.А.,
Торгованова О.Н., Корнеев К.Б., 2025

Аннотация. В статье рассматриваются возможности объяснимого искусственного интеллекта (ХАИ) для энергетических и электроэнергетических систем на примере приложений, которые используют машинное обучение, но еще не используют ХАИ.

Ключевые слова: электроэнергетика, энергосистема, нейронные сети, объяснимый искусственный интеллект, ХАИ, машинное обучение.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-35-43

Современные электрические сети становятся все более децентрализованными, лишаясь общего регулирующего органа. В таких условиях часто невозможно рассматривать сети как единый объект, обладающий неограниченным объемом информации и контролем. Кроме того, динамика изменения электрической нагрузки потребителей и работы возобновляемых источников энергии становится все более

сложной и малопредсказуемой. Это делает традиционные методы управления менее эффективными. Чтобы решить эти проблемы, были проведены исследования в этой области с использованием методов машинного обучения (от англ. Machine Learning – ML). Однако у этих методов есть недостаток – они не поддаются интерпретации. Это может вызвать опасения у инженеров-энергетиков относительно их надежности. Использование объяснимого искусственного интеллекта (ХАИ) способно улучшить качество моделей ML и открыть новые перспективы для исследований [1]. Ниже представлены наиболее применяемые подходы для решения задач, связанных с применением ХАИ в энергосистемах.

Наиболее часто нейросети применяются для управления накопителями энергии, что становится особенно актуальным в связи с ростом доли возобновляемых источников энергии. В настоящее время активно изучается технология обучения с подкреплением (от англ. Reinforcement Learning – RL), которая может быть использована для управления режимами работы накопителей. Надежность систем хранения энергии имеет первостепенное значение, поэтому важно, чтобы любой применяемый алгоритм обеспечивал минимум ошибочных действий. Одной из причин, по которой инженеры-энергетики могут не захотеть использовать методы RL, является то, что малая выборка исходных данных, на которых производилось обучение, может привести к принятию решений, не имеющих четкой причины [2]. В будущем исследователи могут сосредоточиться на применении объяснимого RL для разработки методов и алгоритмов, которые будут понятны и проверяемы инженерами-энергетиками. В частности, рассмотрено применение квантовых нейронных сетей для обнаружения и локализации неисправностей в малых сетях постоянного тока, где методы ХАИ использовались с целью объяснения «весов» (значимости) параметров, принимавшихся в учет при выработке решения. Это позволяет сделать модель более прозрачной и обеспечивает понимание причин предложенных решений операторами энергосистем. Такая интерпретируемость крайне важна при разработке стратегий управления потоками энергии, поскольку помогает избежать принятия необоснованных решений и способствует надежному внедрению технологий искусственного интеллекта (ИИ) в критически важные инфраструктуры, к которым относится электроэнергетика.

Объяснимый искусственный интеллект может также применяться для регулирования частоты и напряжения в электросети. В последнее время для решения таких задач все чаще используется RL, один из методов которого представлен на рис. 1. Одной из причин этой тенденции является растущая интеграция возобновляемых источников энергии и появление новых потребителей. Однако инженеры-энергетики могут опасаться, что существующий алгоритм может не учитывать некоторые экстремальные ситуации, такие как резкое снижение нагрузки, что может привести к нежелательным последствиям [3], вплоть до аварий. В такой ситуации использование ХАИ может помочь понять законы, лежащие в основе алгоритмов RL, и предложить операторам энергосистем более эффективные стратегии для управления распределенной генерацией и предотвращения проблем, связанных со стабильностью частоты и напряжения. Более того, использование этих мощных инструментов в сочетании с пониманием, которое дают методы ХАИ, может стать путем к более быстрому внедрению интеллектуальных систем, оптимально управляющих множеством распределенных источников. RL-агенты демонстрируют способность адаптироваться к быстро меняющемуся балансу нагрузки и генерации [4]. Однако в условиях экстремальных сценариев, таких как резкое снижение нагрузки или

отказ генерирующих мощностей, даже самые мощные алгоритмы оказываются непрозрачными: инженеры не всегда могут понять, почему RL-политика выбирает именно такие действия. Одним из путей решения этой проблемы стало применение XAI. Например, анализ, основанный на концепции значений Шепли (от англ. Shapley Additive exPlanations – SHAP) выявляет, какие входные признаки реально влияют на выбор действий агента.

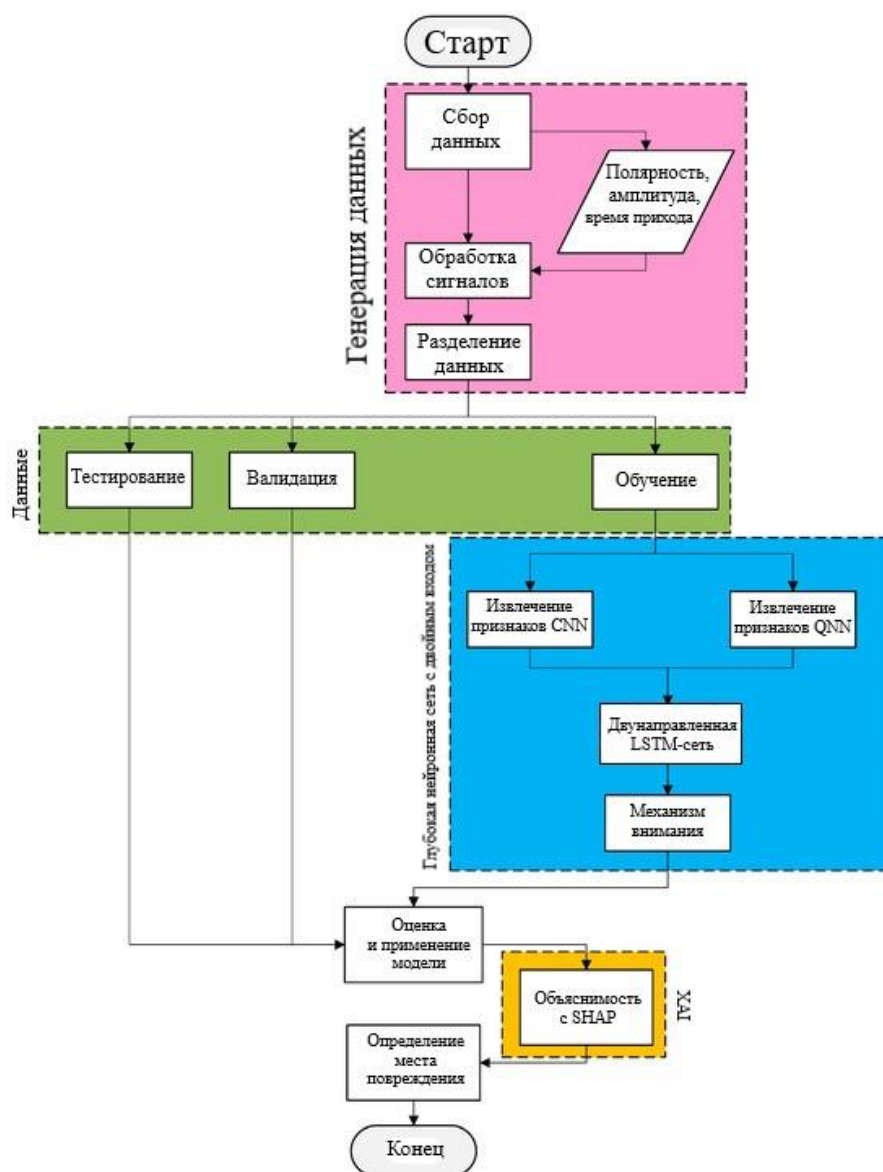


Рис. 1. Блок-схема предлагаемого метода

В рамках реализуемого алгоритма используются как легко алгоритмизируемые методы обработки данных на основе типовых признаков, так и работа с нечеткими множествами признаков, требующих применения нейросетей для их выявления, таких как сверточные нейросети (Convolutional Neural Network, англ. CNN, рус. CHH), помогающие

выделять графические образы в массиве данных, квантовые нейронные сети (Quantum Neural Networks, QNN), обеспечивающие эффективную обработку больших массивов данных. Для эффективной обработки полученных зависимостей используется LSTM (Long Short-Term Memory, долгая краткосрочная память, ДКП) – это особый вид нейросети, который умеет запоминать выявленные долгосрочные зависимости.

На примере многошкального контроллера для управления напряжением было доказано, что SHAP-метод способен выявлять ключевые признаки, которые определяют ответы агента в случае ограниченных измерений в подстанциях. В другом подходе применили дифференцируемые деревья решений, превратив «непрозрачный» RL-агент в прослеживаемую структуру модели, объяснив логику эффективного управления накопителями и электрическими нагрузками. Более того, работы с XAI и RL показали, что комбинация RL и SHAP-интерпретаций позволяет не только контролировать реактивную мощность, но и предсказывает отклонения частоты, статистические пики нагрузки и ошибки прогноза, повышая доверие операторов к использованию методов RL и облегчая внедрение интеллектуальной системы. Таким образом, синергия RL и XAI не ограничивается лишь автоматизацией: она создает прозрачные, проверяемые стратегии управления, которые дают возможность операторам контролировать и понимать действия интеллектуальных агентов, что значительно ускоряет внедрение распределенных систем управления частотой и напряжением.

Обучение с подкреплением также находит применение в сфере планирования энергопотребления. Например, RL используется для динамического ценообразования. Однако эти алгоритмы не объясняют, как формируется изначальная цена. Если в модели ML возникают внезапные скачки цен, системному менеджеру важно понимать их причины. Кроме того, необходимо объяснить, как определяется стоимость электроэнергии для потребителей, что делает эту сферу отличным кандидатом для применения XAI [5].

Одним из последних достижений в области интеллектуальных сетей стало использование потребителями интеллектуальных счетчиков. За последние несколько лет многие публикации были посвящены внедрению методов ML в приложения для потребителей энергии, которые используют информацию, полученную от этих счетчиков. Отмечается, что эта информация может способствовать энергосбережению, улучшать обнаружение неисправностей, прогнозировать спрос, стимулировать к экономии энергии и решать множество других задач. Однако практическая ценность применения ML для этих целей может быть ограничена, поскольку пользователям сложно понять решения, принимаемые этими алгоритмами. Именно поэтому внедрение технологии XAI может повысить доверие пользователей к таким приложениям. Ниже приведены некоторые примеры, подтверждающие эти утверждения.

Одним из способов применения интеллектуальных счетчиков является оценка энергопотребления отдельных устройств через разбивку нагрузки, также известная как ненавязчивый мониторинг нагрузки (от англ. Non-Intrusive Load Monitoring – NILM). В последние годы многие исследователи использовали методы глубокого обучения (DL – Deep Learning) для реализации NILM. Еще одним способом для уменьшения потребления является управление спросом (от англ. Demand Side Management – DSM). Глубокое обучение показало свою эффективность в решении конкретных задач, связанных с DSM, таких как зарядка электромобилей. Однако на пути к реальному внедрению этих технологий стоит проблема недоверия со стороны потребителей. Например, потребитель может быть не готов использовать модель ML, которую он не понимает, для зарядки

своего электромобиля, опасаясь, что автомобиль не будет полностью заряжен в нужный момент. В таких приложениях применение методов ХАИ способно значительно улучшить понимание и полезность моделей для конечных пользователей, обеспечивая надежную и простую обратную связь [6]. Следует отметить, что разрабатываются концепции, которые делают классификаторы интерпретируемыми в том числе для специалистов по ИИ, а не только для повышения доверия конечных пользователей (рис. 2). В исследовании рассматривается использование SHAP-анализа для объяснения факторов, влияющих на прогнозирование спроса на зарядку электромобилей, что способствует повышению доверия водителей к системам управления зарядкой. Такие методы особенно актуальны в условиях высокой интеграции возобновляемых источников энергии и растущего числа электромобилей, когда традиционные подходы могут не учитывать поведенческие аспекты потребителей. Использование ХАИ в данном контексте способствует повышению доверия пользователей к интеллектуальным системам управления и ускоряет их внедрение в реальные энергетические сети [7].



Рис. 2. Предлагаемая структура ИИ для инфраструктуры электромобилей

Еще одним популярным способом приложения ML является мониторинг энергосистемы. Этот процесс включает в себя выявление и локализацию неисправностей, обнаружение дисбалансов в энергосетях и предотвращение кибератак. С возрастающей сложностью сетей эти задачи становятся все более трудными, и для решения часто применяются методы ML, которые отлично подходят для сложных задач распознавания образов [8]. Однако из-за своей «непрозрачной» природы модели ML не могут быть использованы на практике для таких критически важных приложений. Использование ХАИ может помочь эффективно применять эти мощные модели, сохраняя при этом доверие потребителей, необходимое для выполнения ответственных задач. В недавних исследованиях продемонстрирована эффективность интеграции методов ХАИ в задачи мониторинга энергосистем.

Одним из вариантов применения является обнаружение линейных неисправностей, для которого используются измерения на шинах подстанций в качестве входных данных.

Хотя исследования показывают отличные результаты при использовании ML для решения этой задачи, причины построения таких прогнозов остаются неясными. Инженеры-энергетики могут с осторожностью относиться к использованию модели, которая способна принимать решения на основе нерелевантной информации. Использование ХАИ может помочь инженерам-энергетикам понять, основан ли прогноз на соответствующей информации [9]. Например, ХАИ может быть задействован для определения того, какие измерения были использованы для обнаружения неисправности. Или же вариации методов могут быть применены, чтобы помочь системным проектировщикам оптимально разместить измерительное оборудование на шинах, которые модель считает наиболее важными.

Еще одним важным направлением мониторинга энергосистем является обеспечение кибербезопасности. Методы ML применяются для выявления кибератак, таких как ввод ложных данных и вторжения. Однако эти методы не предоставляют объяснения, почему те или иные измерения классифицируются как кибератаки [10]. В результате операторы могут не осознавать суть проблемы, и ее устранение может стать сложной задачей. Как уже упоминалось ранее, понимание этих моделей должно быть на высоком уровне, поскольку неправильная классификация может привести к катастрофическим последствиям (рис. 3). Методы ХАИ способны повысить доверие к таким моделям и предоставить экспертам в области энергетики возможность понять, почему то или иное событие расценивается как кибератака. Отдельно следует отметить методы машинного обучения, реализованные на базе концепции BOSSVS (англ. Bag of Symbolic Fourier Approximation Symbols with Vector Space Model – дословно «мешок символьных переменных в векторном пространстве после дискретного преобразования Фурье»), в которых слабые базовые модели последовательно объединяются в одну сильную, исправляя ошибки предшественников.



Рис. 3. Реализованные модели ML и DL для обнаружения кибератак

В условиях растущей сложности энергетических систем и активного внедрения искусственного интеллекта, прозрачность и интерпретируемость алгоритмов становятся критически важными. Методы ML и DL, особенно RL, демонстрируют высокую эффективность в задачах управления накопителями энергии, регулирования частоты и напряжения, мониторинга состояния сетей, обнаружения неисправностей и обеспечения кибербезопасности (таблица). Однако часто их поведение, наиболее точно описываемое

как «черный ящик», вызывает недоверие как у инженеров-энергетиков, так и у конечных пользователей [11].

Применение ИИ в энергосистемах и энергетике и преимущества, реализуемые с помощью ХАИ

Приложение	Проблема, вызванная недостаточной объяснимостью	Преимущества ХАИ
Управление накоплением энергии с использованием RL	Изученные законы управления могут не иметь смысла для эксперта по энергосистемам и могут рассматриваться как ненадежные	Объяснение логики полученных законов управления и предоставление наглядного алгоритма поведения для эксперта
Управление частотой/напряжением с использованием RL	Изученные законы могут казаться ненадежными в экстремальных ситуациях, например, при ограничении нагрузки	Объяснение принимаемых решений при возникновении критических ситуаций, которым эксперт может доверять
Планирование энергопотребления	Неясные причины, лежащие в основе решений по планированию.	Объяснение причин принятия решений
NILM	Отсутствие доверия потребителей к неинтерпретируемым алгоритмам ML	Повышение доверия потребителей за счет объяснения логики решений
DSM	Опасения потребителей по поводу неинтерпретируемого алгоритма для критических задач	Гарантируемое объяснение поведения и уверенность потребителя в алгоритмах и принятых решениях
Обнаружение неисправностей в линиях	Отсутствие понимания того, какие измерения повлияли на решение	Демонстрация наиболее важных для принятия решений параметров
Кибербезопасность и мониторинг	Неинтерпретируемые решения в критических положениях	Объяснение причин, по которым срабатывает сигнал, и возможность установить, почему это считается кибератакой

Современные модели машинного обучения продемонстрировали впечатляющую эффективность в сфере энергетики и управления энергосистемами. Однако специалистам в области энергетики и обычным пользователям может быть непросто доверять выводам этих алгоритмов, если они не до конца понимают, как они работают на практике и какие математические и физические модели лежат в их основе. Соответственно, цель ХАИ заключается в преобразовании моделей ML таким образом, чтобы они были более понятными и заслуживающими доверия. В рамках этой тенденции ХАИ был реализован в нескольких работах в области энергетики за последние несколько лет. В результате анализа тенденций современных исследований удалось установить, при каких условиях используются различные методы ХАИ. В частности, публикации показывают, что SHAP является наиболее широко используемым методом ХАИ. Кроме того, большинство моделей машинного обучения, применяющих ХАИ, фактически остаются традиционными алгоритмами, в то время как модели DL, включая интерактивные агенты, редко сочетают с ХАИ по причине затруднений с интерпретацией выводов.

Стоит также отметить, что внедрение методов ХАИ в энергетике сталкивается с определенными ограничениями, вытекающими непосредственно из ряда особенностей обработки информации при ML. Хотя ХАИ может облегчить использование методов ML на практике, все еще существуют препятствия, которые следует учитывать, такие как стандартизация, безопасность, а также наличие недостоверной или неполной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликова М.А., Торгованова О.Н., Корнеев К.Б. Методы объяснимого искусственного интеллекта для энергетических и электроэнергетических систем: обзор, проблемы и возможности // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 4 (24). С. 50–57.
2. Vollert S., Atzmueller M., Theissler A. Interpretable Machine Learning: A Brief Survey from the Predictive Maintenance Perspective // *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 2021, pp.1–8.
3. Alvarez-Alvarado M.S., Donaldson D.L., Recalde A.A., Noriega H.H., Khan Z.A., Velasquez W., Rodriguez-Gallegos C.D. Power System Reliability and Maintenance Evolution: A Critical Review and Future Perspectives // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10, pp. 51922–51950.
4. Retzlaff C.O., Angerschmid A., Saranti A., Schneeberger D., Roettger R., Mueller H., Holzinger A. Post-hoc vs Ante-hoc Explanations: xAI Design Guidelines for Data Scientists // *Cogn Syst Res*. 2024. Vol. 86. Article 101243.
5. Аверкин А.Н. Объяснимый искусственный интеллект как часть искусственного интеллекта третьего поколения // *Речевые технологии*. 2023. № 1. С. 4–10.
6. Arrieta A.B., Díaz-Rodríguez N., Del Ser J., Benetot A., Tabik S., Barbado A., García S., Gil-López S., Molina D., Benjamins R. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, Taxonomies, Opportunities and Challenges Toward Responsible AI // *Inf Fusion*. 2020. Vol. 58, pp. 82–115.
7. Корнеев К.Б., Хрусталева М.С., Сизова В.В. Анализ влияния электромобилей на функционирование электросетевой инфраструктуры города // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 1 (17). С. 42–55.
8. Евсеев В.И. Искусственный интеллект в современном мире: надежды и опасности создания и использования // *Аэрокосмическая техника и технологии*. 2023. Т. 1. № 1. С. 16–34.
9. Liao H. Accelerated Testing and Smart Maintenance: History and Future // *IEEE Trans Reliab*. 2023, pp. 1–5.
10. Ahmed I., Jeon G., Piccialli F. From Artificial Intelligence to Explainable Artificial Intelligence in Industry 4.0: a Survey on What, How, and Where // *IEEE Trans Ind Informatics*, 2022. Vol. 18. No. 8, pp. 5031–5042.
11. Gao S., Wang W., Chen J., Wu X., Shao J. Optimal Decision-Making Method for Equipment Maintenance to Enhance the Resilience of Power Digital Twin System under Extreme Disaster // *Glob Energy Interconnect*, 7 (2024), pp. 336–346.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУЛИКОВА Мария Александровна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: mashakilikova@mail.ru

ЧЕБОТАРЕВ Ярослав Алексеевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: yasyasmr@mail.ru

ТОРГОВАНОВА Ольга Николаевна – старший преподаватель кафедры иностранных языков, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: maerz@mail.ru

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Куликова М.А., Чеботарев Я.А., Торгованова О.Н., Корнеев К.Б. Методы объяснимого искусственного интеллекта для энергетических и электроэнергетических систем: возможности применения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 4 (28). С. 35–43.

METHODS OF EXPLAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR POWER AND ELECTRIC POWER SYSTEMS: APPLICATION POSSIBILITIES

M.A. Kulikova, Ya.A. Chebotarev, O.N. Torgovanova, K.B. Korneev
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. This paper examines the potential of explainable artificial intelligence (XAI) for energy and power systems using applications that use machine learning but do not yet use XAI.

Keywords: electric power, power system, neural networks, explainable artificial intelligence, XAI, machine learning.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KULIKOVA Mariya Aleksandrovna – Master’s Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mashakilikova@mail.ru

CHEBOTAREV Yaroslav Alekseevich – Master’s Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: yasyasmr@mail.ru

TORGOVANOVA Olga Nikolaevna – Senior Lecturer of the Department of Foreign Languages, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: maerz@mail

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Kulikova M.A., Chebotarev Ya.A., Torgovanova O.N., Korneev K.B. Methods of explainable artificial intelligence for power and electric power systems: application possibilities // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 35–43.

УДК 669.187:621.186

**ОБУЧЕНИЕ СТУДЕНТОВ УНИВЕРСИТЕТОВ
ИНЖИНИРИНГОВОЙ, ИННОВАЦИОННОЙ РАБОТЕ
НА ОСНОВЕ ВЫПОЛНЕННЫХ В ТВГТУ НИР.
ЧАСТЬ I. ПРОБЛЕМА ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ УНИВЕРСИТЕТОВ
И КОНСТРУКТОРОВ РАСЧЕТАМ ТЕПЛООБМЕНА
В ПЕЧАХ, ТОПКАХ, КАМЕРАХ СГОРАНИЯ**

*А.Н. Макаров**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., 2025

Аннотация. В статье изложены открытые в Тверском государственном техническом университете (ТвГТУ) на кафедре электроснабжения и электротехники закономерности теплового излучения газовых объемов электрических дуг в электродуговых сталеплавильных печах (ДСП) и факелов в факельных нагревательных печах (ФНП), топках паровых котлов (ТПК) электростанций, камерах сгорания (КС) газотурбинных установок (ГТУ), газотурбинных двигателей (ГТД). В части I статьи изложена существовавшая в 1950–1990-х годах, до открытия законов теплового излучения газовых объемов, проблема обучения студентов университетов расчетам теплообмена в ДСП, ФНП, ТПК, КС ГТУ. На основе открытых законов в ТвГТУ разработаны современные методики расчета теплообмена в ДСП, ФНП, ТПК, КС.

Ключевые слова: научные исследования, научное открытие, теплообмен, излучение, печи, топки, камеры сгорания, студенты, обучение.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-44-53**ВВЕДЕНИЕ**

В промышленно развитых странах, в том числе и в России, 35–40 % стали выплавляют в электродуговых сталеплавильных печах (ДСП). В металлургии России используют более 50 ДСП, каждая из которых обладает вместимостью 100–200 т металла, производительностью 1–2 млн т стали в год, мощностью электропечного трансформатора 90–150 МВА. Одна ДСП расходует мощность, равную 50–75 % мощности, потребляемой областным центром с населением 500 тыс. человек и расположенной в нем промышленностью. Электрические дуги являются основными источниками тепла в ДСП [1]. По результатам энергетических балансов на долю дуг в современных ДСП приходится 60–65 % тепла, поступающего в печь [2–4]. Вся электрическая мощность, подведенная к электрической дуге, преобразуется в ней в тепловую мощность. Подавляющая часть мощности дуги, 92–95 %, выделяется в столбе дуги в виде потока теплового излучения [2–6], который распространяется по всем направлениям рабочего пространства печей. Теплообмен излучением является основным видом теплообмена в ДСП. Столб дуги в ДСП представляет собой ионизированный газовый объем в форме усеченного конуса, который, в связи с равномерным распределением мощности по высоте столба, в расчетах теплообмена моделируется излучающим цилиндрическим ионизированным газовым объемом [1–14]. До конца 1970-х годов электрическая дуга в ДСП как источник теплового излучения представляла собой «черный ящик» [1–6].

В XIX–XX веках в топках паровых машин на решетках сжигали уголь, торф, сланцы, дрова. Энергия, выделяемая при сжигании твердого топлива, на 90–95 % состоит из энергии теплового излучения. В 1879–1884 годах Стефан и Больцман открыли закон теплового излучения абсолютно черного тела (АЧТ), твердого тела для расчета теплообмена в печах, топках, работающих на твердом топливе. Плотность потока теплового излучения твердого тела, топлива на нагреваемое твердое тело по закону Стефана – Больцмана определяется по следующей формуле [15–20]:

$$q = c_s \varepsilon_{np} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{12}, \quad (1)$$

где c_s – коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε_{np} – приведенный коэффициент излучения; T_1, T_2 – температура, соответственно, горящего твердого топлива на колосниковых решетках и поверхности нагрева, К; φ_{12} – угловой коэффициент (доля излучения) слоя топлива на поверхность нагрева.

Закон Стефана – Больцмана (1) используется для определения плотностей потоков тепловых излучений твердого топлива (рис. 1), находящегося на колосниковых решетках (угля, торфа, сланцев), на экранные поверхности труб в топках паровых котлов (ТПК) электростанций, где он дает безукоризненный результат расчета [15].



Рис. 1. Горение твердого топлива на колосниковой решетке в ТПК

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ В ПЕЧАХ, ТОПКАХ, КАМЕРАХ СГОРАНИЯ В XX ВЕКЕ

В 1940–1950-х годах начали добывать природный газ и использовать факельное сжигание газообразного, жидкого, пылеугольного топлива в факельных нагревательных печах (ФНП), ТПК электростанций, камерах сгорания газотурбинных установок (КС ГТУ), КС газотурбинных двигателей (ГТД). В России на тепловых электрических станциях установлено около 2 тыс. энергоблоков мощностью от 30 до 1 200 МВт. В ТПК сжигают 45–50 % добываемых и используемых в мире, в том числе в России, топливно-энергетических ресурсов. При факельном сжигании топлива в ФНП в металлургии и машиностроении, в ТПК, КС ГТУ тепловых электрических станций (ТЭС), КС ГТД тепловые потоки, падающие от газового объема факела на поверхности нагрева, на 95–97 % состоят из потоков теплового излучения [15–20]. Процессы преобразования электрической энергии в газовом объеме электрической дуги, горящей в ДСП [21–28], и

энергии топлива при его факельном сжигании в ФНП, ТПК ТЭС, КС ГТУ ТЭС, КС ГТД идентичны: электрическая энергия в электрической дуге ДСП и энергия топлива при его факельном сжигании преобразуется в поток теплового излучения [14–21].

В факеле, электрической дуге, излучаются квадриллионы атомов, излучение каждого атома на расчетную площадку необходимо учесть, что является сверхсложной проблемой. Для определения теплового излучения факела на расчетную площадку необходимо решить трехкратные интегральные уравнения теплообмена излучением. Решения трехкратных интегральных уравнений для определения потоков теплового излучения, угловых коэффициентов излучения факела на расчетную площадку, средней длины пути лучей от излучающих атомов до расчетной площадки в XX веке не было найдено. На протяжении XX века, до открытия в России законов теплового излучения ионизированных (электрическая дуга в ДСП) и неионизированных (факел в печах, топках, КС) газовых объемов, расчет теплообмена в печах, топках, КС осуществляли по закону Стефана – Больцмана теплового излучения поверхности твердых тел [15–20, 29–33] (плоская модель). На основе закона Стефана – Больцмана были разработаны методы расчета Чандрасекара, Шварцильда – Шустера, зональный, численный и другие, однако они не получили распространения, так как излучение газовых объемов не подчиняется закону теплового излучения поверхности твердых тел и погрешность расчетов составляет 200–300 % и более [3, 20].

Например, в ФНП для нагрева слитков перед прокаткой мощность газового объема факела газокислородной горелки (ГКГ), созданного сжиганием газообразного топлива, составила 5 МВт при температуре 20 °С подаваемого в ГКГ воздуха. Среднемассовая температура газового объема факела составляет 1 300 °С [20]. Средняя плотность теплового потока излучения газового объема факела на расчетную площадку на слитках, рассчитанная по формуле (1), составляет 40 кВт/м². При подогреве подаваемого в ГКГ воздуха до 600 °С среднемассовая температура газового объема факела возросла до 2 000 °С, а мощность факела возросла на 17 %. При расчетах по выражению (1) плотность потока теплового излучения газового объема факела на расчетную площадку на слитках увеличилась с 40 до 200 кВт/м², т.е. в 5 раз, скорость нагрева слитков также должна возрасти в 5 раз, что противоречит закону сохранения энергии. В реальных условиях эксплуатации нагреваемой печи при подогреве воздуха до 600 °С и увеличении мощности газового объема факела на 17 % плотность теплового потока от факела и скорость нагрева слитков увеличились на 17 %, т.е. прямо пропорционально увеличению мощности газового объема факела, а не температуре в четвертой степени [3]. Погрешность в расчетах теплового излучения газового объема факела на поверхность слитков по закону теплового излучения твердых тел (1) составила 427 %.

В 1960–2000 годы студентов университетов, будущих конструкторов, обучали следующим методам расчета теплообмена излучением в ФНП, ТПК, КС [15–20]: статистического моделирования Монте-Карло, решения уравнений переноса Шварцильда – Шустера и Эддингтона, итерационному Чандрасекара, итерационному Владимирова, сферических гармоник и другим. Для расчета теплообмена в ТПК наибольшее распространение получил метод зонального математического моделирования.

Сущность зонального метода заключается в делении излучающих поверхностей и газовых объемов на зоны и замене непрерывного распределения температур и физических характеристик кусочно-непрерывным, состоящим из конечного числа излучающих макросистем, однородных зон [15]. В результате этого интегро-дифференциальные

уравнения, описывающие лучистый теплообмен, заменяются аппроксимирующей системой алгебраических уравнений, с помощью которой определяются искомые температуры зон и тепловые потоки между зонами:

$$\sum_{i=1}^{m+n} a_{ij} T_i^4 + \sum_{i=1}^m V_{ij} c_i t_i - c_j t_j \sum_{i=1}^m V_{ji} + \sum_{i=1}^n \alpha_{kij} F_{ij} (t_i - t_j) + \sum_r V_{ojr} c_{or} t_{or} = 0, \quad j = 1 \div m, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{m+n} a_{ij} T_{ij}^4 + \sum_{i=1}^n \alpha_{kij} F_{ij} (t_i - t_j) + k_j F_j (t_n - t_j), \quad j = 1 \div n, \quad (3)$$

где m, n, m', n' – соответственно число объемных и поверхностных зон и соседних зон; a_{ij} – коэффициент радиационного теплообмена; T_i, t_n – температура объемных и поверхностных зон; V_{ij} – расход топочной среды из i -й в j -ю зону; c_i, c_{or} – теплоемкость; α_{kij} – коэффициент теплоотдачи конвекцией; F_{ij} – площадь соприкосновения объемной и поверхностной зон; V_{ojr} – приток рабочего тела в j -тую зону; k_j – коэффициент теплопередачи; F_j – площадь зоны.

Рассмотрим современную ТПК и расчет теплообмена в топке зональным методом (рис. 2). Топка парового котла энергоблока 300 МВт представляет собой прямоугольный параллелепипед высотой $H = 35$ м, шириной $a = 14$ м, глубиной $b = 7$ м. С внутренней стороны поверхности топки выполнены вертикальными водяными трубами. Котел работает на мазуте, 16 горелок (обозначены на рис. 2а стрелками) суммарной производительностью $B_K = 67$ т/ч установлены встречно в 2 яруса по 8 горелок в ярусе на высоте 3 и 6 м от поверхности пода.

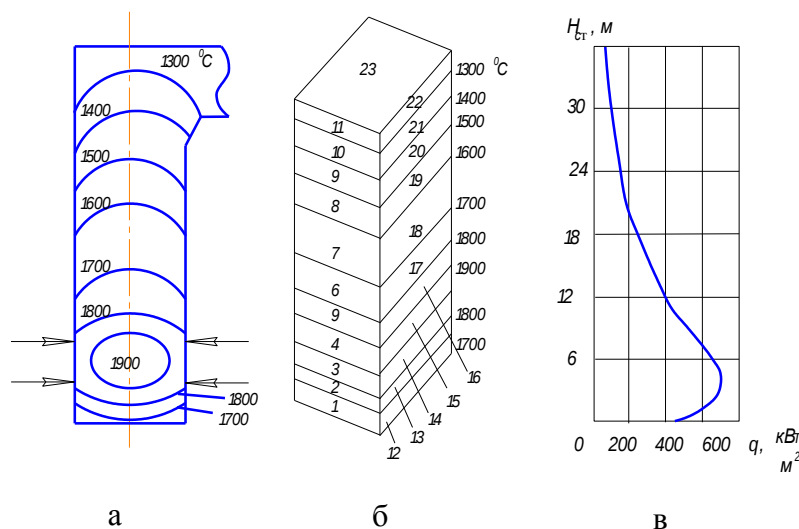


Рис. 2. Топка парового котла энергоблока мощностью 300 МВт и распределение изотерм по высоте топки (а); деление топки на расчетные зоны (б); результаты расчета распределения плотности потока излучения по вертикальной оси фронтальной стены (в)

Теплота сгорания мазута $Q_p^H = 41$ мДж/кг, коэффициент ослабления среды в топке $k = 0,162$ [15]. Расположение изотермы по высоте топки показано на рис. 2а. Факел по высоте и периметру заполняет всю топку и представляет собой прямой эллиптический цилиндр. Изотермы делят по высоте прямой эллиптический цилиндр на семь объемных

зон. Зональный метод расчета теплообмена в топке заключается в следующих расчетных процедурах. Топка парового котла разбивается в соответствии с расположением изотерм по высоте на 11 объемных и 46 поверхностных зон (см. рис. 2б). Составляется система интегро-дифференциальных уравнений, описывающих лучистый теплообмен, которая аппроксимируется системой алгебраических уравнений (2), (3). В системе алгебраических уравнений излучение прямоугольных газовых объемов заменяется излучением поверхностей прямоугольных параллелепипедов, а тепловое излучение поверхностей определяется по закону Стефана – Больцмана (см. формулу (2)). Результаты расчета на компьютере распределения плотности потока излучения факела по вертикальной оси фронтальной стены представлены на рис. 2в [15]. Сравнение расчетных (см. рис. 2в) и экспериментальных данных [19] показывает, что их различие по высоте топки может составлять 200 %.

ПРОБЛЕМА РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА В ПЕЧАХ, ТОПКАХ, КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

Несмотря на то, что зональный метод совершенствуется на протяжении последних 50 лет и стал инженерным методом расчета, он обладает рядом недостатков:

дифференциальные и алгебраические уравнения теплообмена не являются аналитическими выражениями, формулами, которыми при возможности решения дифференциальных уравнений заканчивается построение любой теории;

при расчете излучения газового объема используется закон Стефана – Больцмана, полученный для расчета излучения поверхностей твердых тел;

рассчитывается излучение и поглощение излучения макроуровневых систем, объемных и поверхностных зон, и не учитывается излучение микроуровневых систем, излучающих частиц;

объемное излучение газа, заполняющего камеру печи, топки, КС, в расчетах заменяется поверхностным.

Зональный и другие вышеперечисленные методы расчета теплообмена в ТПК, основанные на законе Стефана – Больцмана, не позволяют выявить распределение тепловых потоков по всем поверхностям нагрева (см. рис. 2в). Зональным методом рассчитывали распределение плотности потока излучения в камерах ТПК по высоте только одной фронтальной стены по вертикальной оси ее симметрии [15–18]. В России и за рубежом в XX веке в учебниках, монографиях, статьях отсутствовали данные по расчету плотности потоков излучения по периметру и высоте фронтальной и боковой стен, на периферии стен ТПК. Расчет и анализ распределения плотностей потоков излучения факела по высоте фронтальной стены ТПК, выполненный по законам теплового излучения поверхностей твердых тел, показал значительную погрешность расчета. Современная наука не догма, совершенно очевидно, что возникла необходимость принципиально иного решения задачи теплообмена в ТПК.

На протяжении всего XX века в учебниках для студентов, монографиях, статьях российских и зарубежных ученых отсутствовала информация о распределении тепловых потоков излучений в топках по оси симметрии и на периферии экранных поверхностей (рис. 3), о причинах повреждения горелочных устройств, неравномерности парообразования и внутритрубных отложений по высоте и периметру экранных поверхностей, о причинах неравномерности распределения тепловых потоков излучения газовых объемов по поверхностям нагрева в ДСП, ФНП, КС ГТУ.

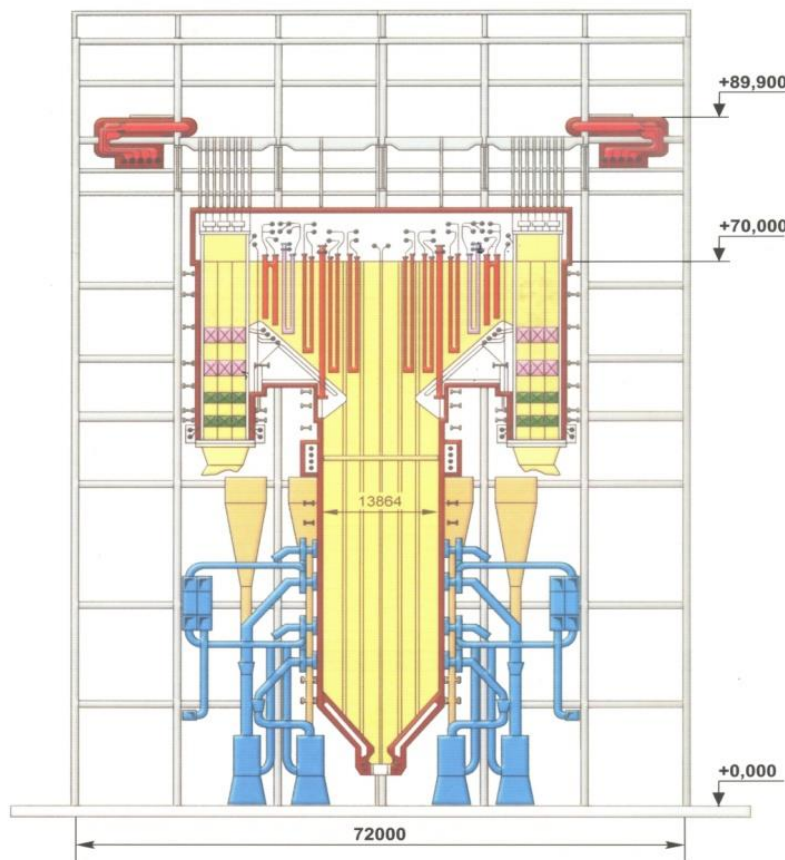


Рис. 3. Топка парового котла энергоблока мощностью 500 МВт
«ЗиО-Подольск» [3]

Локальные знания о теплообмене в ДСП, ФНП, ТПК, КС ГТУ добывали в ходе многочисленных экспериментальных исследований теплообмена в энергоустановках. Эти дорогостоящие и ресурсозатратные методы не позволяли получить полную картину теплообмена вследствие своей сложности, малой эффективности, отсутствия серийных приборов для измерения тепловых потоков излучений по поверхностям нагрева в дуговых и факельных печах, топках, КС.

Отсутствие надежных методик расчета теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, КС приводило к сдерживанию их развития, совершенствования, препятствовало созданию инновационных, более совершенных факельных печей, топок с различным расположением горелок и факелов в них (рис. 4, 5).



Рис. 4. Внутренний вид части топки парового котла, горелки, факела [3]

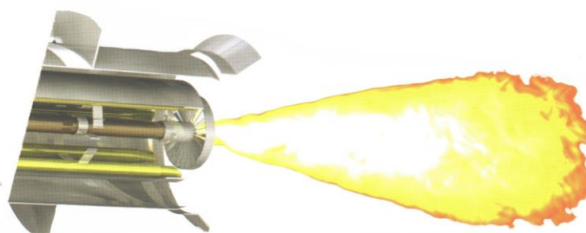


Рис. 5. Горелка с факелом [3]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отсутствие надежной методики расчета теплообмена не позволяло студентам, конструкторам проводить расчеты теплообмена и прогнозировать создание более совершенных эффективных факельных печей, топок, КС. В конструкцию большей части прямоточных ТПК и ФНП несколько десятилетий не вносилось кардинальных изменений, способствующих выравниванию распределения потоков излучений факелов по поверхностям нагрева. С открытием в России, в ТвГТУ, законов теплового излучения газовых объемов факелов появилась возможность рассчитать с высокой точностью теплообмен (распределение тепловых потоков по поверхностям нагрева), прогнозировать изменение распределения тепловых потоков по поверхностям нагрева при изменении конструкций факельных печей, топок, КС и расположения горелок и факелов в них, создавать инновационные факельные печи, топки, КС, в которых выравниваются тепловые потоки по поверхностям нагрева, снижаются время нагрева, расход топлива, эксплуатационные расходы на промывку котлов от внутритрубных отложений, расходы на опытно-экспериментальные исследования КС ГТУ, уменьшается количество разрушений КС, повышается ресурс их работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сисоян Г.А. Электрическая дуга в электрической печи. М.: Металлургия, 1971. 304 с.
2. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
3. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок. Москва – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 452 с.
4. Дорофеев Г.А., Зинягин Т.А., Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 324 с.
5. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1985. 280 с.
6. Окроков Н.А. Дуговые сталеплавильные печи. М.: Металлургия, 1971. 347 с.
7. Осинцев К.В. Способ снижения теплового потока на горелочные амбразуры // *Электрические станции*. 2009. № 11. С. 24–28.

8. Makarov A.N. Calculation of Heat Transfer in the Furnaces of Steam Boilers According to the Laws of Radiation of Gas Volumes. *Heat Transfer-Models, Methods and Applications*. London: InTechOpen. 2018, pp. 111–130.
9. Makarov A.N. Fundamental Laws of Physics and Calculation of Heat Transfer in Combustion Chambers of Gas Turbine Plants // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2017. No. 5, pp. 358–375.
10. Makarov A.N. Calculation of Heat Transfer in Torch Furnaces by Gas Volume Radiation Laws // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2016. No. 4, pp. 488–503.
11. Makarov A.N. Flare Temperature and Nitrogen Oxide Emission Reduction in the TGMP314I Steam Boiler Firebox // *Power Technology and Engineering*. 2016. No. 2 (50), pp. 200–203.
12. Меркер Э.Э., Черменов Е.А. Электроплавка металлизированных окатышей в дуговой печи. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 320 с.
13. Шишимиров М.В., Сосонкин О.М. Ресурсосбережение и резервы повышения эффективности выплавки стали в ДСП // *Вестник ЮУрГТ. Серия «Металлургия»*. 2015. № 3. С. 70–79.
14. Шешуков О.Ю., Некрасов И.В., Невидимов В.Н. Температурный режим шлака сверхмощной ДСП и технологические параметры плавки // *Вестник МГТУ им. Г.И.Носова*. 2010. № 1. С. 29–31.
15. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжов Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
16. Расчет нагревательных и термических печей: справочник / под ред. В.М. Тымчака и В.Л. Гусовского. М.: Metallurgia, 1983. 480 с.
17. Зигель Р., Хауэлл Д. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с.
18. Сперроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. Л.: Энергия, 1971. 294 с.
19. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках: учебное пособие. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
20. Мاستрюков Б.С. Теплотехнические расчеты промышленных печей: учебник. М.: Metallurgia, 1972. 368 с.
21. Макаров А.Н. Теплообмен в высокомоощных дуговых сталеплавильных печах. Часть I. Расчет потоков теплового излучения дуг на ванну и теплообмен в ванне металла // *Металлург*. 2022. № 7. С. 28–34.
22. Сутягин К.Л. Разработка метода прогнозирования показателей работы дуговых сталеплавильных печей: дисс. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2006. 160 с.
23. Макаров А.Н., Свенчанский А.Д. Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей. М.: Энергоатомиздат, 1992. 96 с.
24. Кузьменко А.Г., Фролов Ю.Ф., Поздняков М.А. и др. Технология и электропечи CONSTEEL: перспективы применения в отечественной металлургии // *Сталь*. 2016. № 4. С. 16–21.
25. Симонян Л.М., Хилько А.А., Зубкова С.В. Свойства электросталеплавильной пыли и анализ возможных направлений ее использования // *Электрометаллургия*. 2010. № 8. С. 24–28.
26. Опферман А., Гроссе А., Вольфарт С. Совершенствование электроплавильного производства на заводе BADISCHESTAHLOWERKE // *Черные металлы*. 2015. № 2. С. 55–61.

27. Волос Д.Л. Исследование теплообмена в свободном пространстве дуговой сталеплавильной печи и разработка методики расчета ее водоохлаждаемых элементов: дисс. ... канд. техн. наук. Череповец: ЧГУ, 2005. 165 с.
28. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Сооружение промышленных печей. Проектирование плавильных комплексов: справочное издание в 3 т. / под ред. В.Г. Лисиенко. М.: Теплотехник, 2006. Кн. 2, Т. I. 755 с.
29. Макаров А.Н. Теплообмен в высокоомощных дуговых сталеплавильных печах. Часть III. Взаимосвязь теплообмена, высоты слоя шлака, КПД дуг и удельного расхода электроэнергии // *Металлург*. 2022. № 11. С. 41–46.
30. Makarov A.N. Regularities of Heat Exchange in Gas Layers of a Torch and Screens of Fire Chambers of Boilers. Part I. Geometrical and Model Torch as Source of the Thermal Radiation // *Thermal Engineering*. 2014. No. 8, pp. 26–32.
31. Makarov A.N. Regularities of Heat Exchange in Gas Layers of a Torch and Screens of Fire Chambers of Boilers. Part II. Laws of Radiation of Gas Layers and the Method of Calculation of Heat Exchange Developed on Their Basis in Furnaces, Fire Chambers, Combustion Chambers // *Thermal Engineering*. 2014. No. 10, pp. 24–31.
32. Makarov A.N. Regularities of Heat Exchange in Gas Layers of a Torch and Screens of Fire Chambers of Boilers. Part III. Examples of Calculation of Heat Exchange in Torch Furnaces and Fire Chambers of Boilers // *Thermal Engineering*. 2014. No. 11, pp. 46–54.
33. Макаров А.Н. Методология научных исследований в университетах и промышленных компаниях. Москва – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 276 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tgту_kafedra_ese@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Обучение студентов университетов инжиниринговой, инновационной работе на основе выполненных в ТвГТУ НИР. Часть I. Проблема обучения студентов университетов и конструкторов расчетам теплообмена в печах, топках, камерах сгорания // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 4 (28). С. 44–53.

**TRAINING UNIVERSITY STUDENTS IN ENGINEERING, INNOVATIVE WORK
BASED ON THE RESEARCH WORK PERFORMED
AT TVER STATE TECHNICAL UNIVERSITY.
PART I. THE PROBLEM OF TRAINING UNIVERSITY STUDENTS AND DESIGNERS
IN HEAT TRANSFER CALCULATIONS
IN FURNACES, FURNACES, COMBUSTION CHAMBERS**

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article presents the laws of thermal radiation of gas volumes of electric arcs in electric arc steelmaking furnaces (EASF) and torches in flare heating furnaces (FHF), furnaces of steam boilers (FSB) of power plants, combustion chambers (CC) of gas turbine units (GTU), gas turbine engines (GTE), discovered at the Department of Power Supply and Electrical Engineering of Tver State Technical University (TSTU). Part I of the article presents the problem of teaching university students to calculate heat transfer in EASF, FHF, FSB, CC of GTU, which existed in the 1950–1990s, before the discovery of the laws of thermal radiation of gas volumes. Based on the discovered laws, modern methods for calculating heat transfer in EAF, FBC, FBC, CC have been developed at TvSTU.

Keywords: scientific research, scientific discovery, heat exchange, radiation, furnaces, fireboxes, combustion chambers, students, training.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head 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

Makarov A.N. Training university students in engineering, innovative work based on the research work performed at Tver State Technical University. Part I. The problem of training university students and designers in heat transfer calculations in furnaces, furnaces, combustion chambers // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 44–53.

УДК 519.718:621.316.1

ЭВОЛЮЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ: ОБЗОР И АНАЛИЗ

Павлова Ю.М.¹, Корнеев К.Б.¹, Корнеев В.К.²

¹*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

²*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (г. Москва)*

© Павлова Ю.М., Корнеев К.Б., Корнеев В.К. 2025

Аннотация. В статье представлен подробный обзор различных задач оптимального распределения мощности (OPF) и широкого спектра алгоритмов (как традиционных, так и эволюционных), применяемых для их решения. Особое внимание уделено интеграции ветровой энергии и многоцелевым стратегиям оптимизации.

Ключевые слова: оптимальное распределение потоков мощности, классические алгоритмы, эволюционные алгоритмы, многоцелевые задачи, возобновляемые источники энергии.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-54-67

Введение

Прошло более пяти десятилетий с тех пор, как задача оптимального распределения мощности (OPF, англ. OPF – Optimal Power Flow) стала одной из самых известных и часто используемых задач нелинейной оптимизации в энергосистемах. Несмотря на долгое существование, задача OPF по-прежнему широко исследуется из-за ее ключевой роли в планировании режимов работы и управлении электрическими сетями. Общая формулировка OPF представляет собой крупномасштабную задачу нелинейной невыпуклой оптимизации, включающую как дискретные, так и непрерывные управляющие переменные. Учет технических факторов управления, таких как переключения отпаек трансформаторов или наличие шунтирующих конденсаторов, а также интеграция возобновляемых источников энергии, еще больше усложняет проектирование и выполнение задачи. Для решения этих проблем были разработаны различные методы: классические, эволюционные и усовершенствованные оптимизационные техники.

Эти методы не только открывают новые возможности, но и повышают качество существующих решений, что способствует снижению вычислительных затрат и повышению эффективности эксплуатации. Многоцелевые подходы часто применяются в современных задачах OPF для поиска компромиссов между конкурирующими целями, такими как минимизация затрат, снижение потерь электроэнергии и уменьшение воздействия на окружающую среду.

В настоящее время при проектировании и дальнейшей эксплуатации энергосистем инженерам-энергетикам необходимы специальные технические инструменты, в первую очередь специализированное программное обеспечение. Почти все подходы, реализуемые указанными инструментами, можно рассматривать как решение задач оптимизации.

С момента своего появления в начале 1960-х годов задача OPF интенсивно изучается, а впервые была сформулирована Доммелем и Тинни [1, 2]. Она изначально

задумывалась как логическое расширение классической задачи экономического распределения нагрузки (ED, англ. ED – Economic Dispatch) [3]. Несмотря на то, что обе задачи оптимизации могут преследовать одну и ту же цель, между ними существуют различия. ED сводит всю энергосистему к единому уравнению-ограничению. OPF же напрямую учитывает все ключевые компоненты системы в динамике. В отличие от ED, задача OPF непосредственно учитывает сетевые ограничения, параметры элементов энергосистемы и взаимосвязь между режимными переменными.

Исторически задачи OPF были сосредоточены главным образом на ключевых целях внутри энергосетей: минимизации экономических затрат (эксплуатационных расходов генерирующего оборудования, в первую очередь – на тепловых электростанциях), снижении потерь активной и реактивной мощности в распределительных сетях, повышении эффективности управления потоками мощности, надежности работы электроэнергетической системы и сокращении загрязнения окружающей среды [4]. На начальных этапах преобладали более простые одноцелевые задачи с меньшим числом ограничений из-за их эксплуатационной эффективности. Распространенные методы решения этих задач были основаны на математическом моделировании и выпуклых зависимостях.

Тем не менее метаэвристические и эволюционные методы оптимизации оказались эффективными при решении многоцелевых задач с ограничениями в крупных энергосетях [5]. В отличие от более ранних подходов, современные постановки задачи OPF учитывают экологические и надежность критерии, включаемые в целевую функцию и систему ограничений, в частности показатели выбросов загрязняющих веществ (EP – Emission Pollution) и надежности работы энергосистемы. В современных исследованиях постановки задачи OPF ориентированы на учет совокупности критериев оптимизации, включая повышение устойчивости режимов работы, снижение выбросов EP и обеспечение надежной и экономически эффективной эксплуатации энергосистемы. Достижение указанных критериев обеспечивается за счет учета резервов мощности, эксплуатационных ограничений и агрегированных целевых функций на уровне всей электроэнергетической системы.

За последние два десятилетия усиливающиеся экологические проблемы, особенно связанные с выбросами электростанций, потребовали включения таких целей для решения специфических задач. В результате современные условия функционирования энергосистем требуют точного и своевременного решения многоцелевых задач оптимизации, направленных на повышение эффективности, экологической устойчивости и надежности энергоснабжения [6].

С учетом постоянно меняющегося характера энергосистем, исследования в области OPF эволюционировали от своей первоначальной формы. Отказ от централизованного регулирования энергетического сектора, достижения в области силовой электроники и экологические нормы, установленные на электростанциях, сыграли важнейшую роль в постоянной переработке задач OPF, таких как обеспечение баланса надежностью энергоснабжения, стоимостью генерации и интеграцией возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ). С момента своего появления OPF было тесно связано с развитием численных методов оптимизации [7]. Для решения задачи OPF исследователи применяли широкий спектр численных и эвристических подходов.

Оптимальное распределение мощности – это метод, позволяющий определить режимные параметры энергосистемы таким образом, чтобы заданная целевая функция

достигала наилучшего значения (наибольшего или наименьшего в зависимости от выбранной функции) при соблюдении всех перетоков мощности в системе, требований безопасности и эксплуатационных ограничений. При решении задачи формируется обратная связь, приводящая к изменению некоторых управляющих параметров, в целях создания наилучшей конфигурации сети.

Наиболее часто используемые оптимизационные переменные OPF включают [7]:
активную мощность генерирующего оборудования;
величину напряжения на генераторных шинах;
наличие и мощность шунтирующих реакторов;
положение отпаяк силовых трансформаторов;
наличие устройств FACTS (гибкие системы передачи переменного тока) и фазосдвигающих устройств.

В рамках задачи OPF зависимыми управляемыми переменными являются:
величина напряжения на шинах нагрузки;
величины потоков мощности в линиях (в МВА);
значения максимальной реактивной мощности генераторов;
активная мощность, передаваемая по межсистемным линиям электропередачи.

1. Математическая формулировка

Как правило, задача OPF представляет собой сильно ограниченную невыпуклую, нелинейную, крупномасштабную задачу статической оптимизации, которая задается следующим образом [8]:

$$\min f(x, u), \quad (1)$$

$$\begin{cases} g(x, u) = 0 \\ h(x, u) \leq 0 \end{cases}, \quad (2)$$

где f указывает целевую функцию, x и u выражают зависимые и управляющие векторы параметров вместе, а $g(x, u)$ и $h(x, u)$ обозначают ограничения равенства и неравенства.

В задаче OPF используется множество различных целевых функций, среди которых наиболее распространенной является минимизация затрат на выработку электроэнергии генераторами. Для правильного функционирования энергосистемы важно поддерживать напряжения на различных шинах как можно ближе к номинальным значениям. При увеличении нагрузки падение напряжения на высоконагруженных линиях электропередачи (ЛЭП) приводит к нестабильности напряжения у потребителей и на генерирующих предприятиях. Ожидается, что будут доступны управляемые источники реактивной мощности, которые смогут обеспечить необходимую поддержку для улучшения профиля напряжений.

Кроме того, в условиях растущего внимания к вопросам экологии, сокращение выбросов ЕР также стало одним из компонентов задачи OPF. Таким образом, исследования в области OPF могут включать такие цели, как сокращение выбросов, уменьшение потерь мощности и снижение индекса L, и эти цели подробно описаны в следующих разделах [9].

1.1. Целевые функции

1.1.1. Минимизация затрат на топливо

Базовая квадратичная кривая затрат, используемая для описания затрат на топливо для генераторов на тепловых электростанциях, имеет следующий вид [9]:

$$f = \sum_{m=1}^{NG} (a_m + b_m P_{Gm} + c_m P_{Gm}^2), \quad (3)$$

где a_m , b_m , c_m – коэффициенты стоимости генератора m^{th} , NG – общее количество генераторов, а P_{Gm} – мощность на генераторе m^{th} .

1.1.2. Минимизация затрат в тепловых турбинах

С учетом того, что тепловые электростанции в настоящее время продолжают играть ведущую роль в выработке электроэнергии в России и ряде других развитых стран, производство электроэнергии в генераторе определяется эффективностью работы паровой турбины, приводящей во вращение генератор. При работе турбины в режимах высокой мощности открытие регулирующих клапанов подачи пара может приводить к дополнительным механическим нагрузкам на элементы проточной части. В частности, возрастает натяжение стержневых проволоч, соединяющих подвижные лопатки, что со временем может приводить к ухудшению условий циркуляции пара и росту температуры в турбине. Чтобы смоделировать эффект нагрузки на клапаны, к квадратичной модели производственных затрат добавляют синусоидальные компоненты. Таким образом, можно записать невыпуклые функции производственных затрат в виде следующей формулы [9]:

$$f = \sum_{m=1}^{NG} (a_m + b_m P_{Gm} + c_m P_{Gm}^2 + |d_m \cdot \sin(e_m \cdot (P_{Gm}^{min} - P_{Gm}))|), \quad (4)$$

где d_m , e_m – синусоидальные коэффициенты стоимости блока m^{th} , а P_{Gm}^{min} – минимальный предел генератора m^{th} .

1.1.3. Минимизация L-индекса

Напряжения на всех шинах потребителей в энергосистеме должны находиться в пределах допустимых значений. Неоптимизированные управляющие переменные могут вызвать значительное и постепенное снижение напряжения, что при любом возмущении системы может привести к ее коллапсу по напряжению.

Показатель запаса устойчивости напряжения оценивается с помощью L-индекса, который был разработан в источнике [10]. Например, состояние коллапса напряжения на шине может быть определено по текущему значению этого индекса. Как правило, значения L-индекса лежат в диапазоне от 0 до 1.

Ниже представлено математическое выражение функции, соответствующей цели минимизации L-индекса [9]:

$$f = \min(\max(L_m)), \quad (5)$$

где L_m – L-индекс для m -й нагрузочной шины, который выражается следующей формулой [10]:

$$L_m = \left| 1 - \frac{\sum_{n=1}^{NG} H_{mn} V_n}{V_m} \right|, \text{ где } m = 1, 2, \dots, NL, \quad (6)$$

$$H_{mn} = -[inv(Y_{mm})] \cdot [Y_{mn}], \quad (7)$$

где Y_{mm} – проводимость m -й шины и Y_{mn} – проводимость между m -й и n -й шинами.

1.1.4. Минимизация потерь в линиях передачи

Целевая функция для уменьшения потерь в линиях передачи определяется математически следующим образом [9]:

$$f = \sum_{n=1}^{nl} G_n (V_m^2 + V_n^2 - 2V_m V_n \cos \Theta_{mn}), \quad (8)$$

где G_n – проводимость n^{th} -й линии.

1.1.5. Минимизация выбросов загрязняющих веществ

В настоящее время общество ожидает от тепловых электростанций не только надежного электроснабжения, но и низкого уровня загрязнения окружающей среды. Поэтому одной из целей OPF является снижение выбросов EP, что может быть описано следующим образом [9]:

$$f = \sum_{n=1}^{NG} (\alpha_k + \beta_k P_{Gk} + \gamma_k P_{Gk}^2 + \mu_k \exp(\xi_k P_{Gk})), \quad (9)$$

где $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \mu_k, \xi_k$ – коэффициенты выбросов для k -го генератора (единицы).

2. Множество алгоритмов, применяемых для решения задач OPF

Основная задача данного обзорного исследования заключается в том, чтобы свести воедино ряд методов, предложенных в разное время различными исследователями, включая классические, итерационные, эволюционные и гибридные эволюционные подходы, используемые для решения задач OPF. В таблице приведено описание алгоритмов, используемых в различных постановках данной задачи.

Сводный перечень методов расчета оптимального распределения мощности

Категория	Подкатегория	Алгоритмы
Классические алгоритмы	Классические	Метод градиента, Метод линейного программирования, Метод Ньютона, Метод внутренней точки, Метод квадратичного программирования, Метод динамического программирования
Эволюционные алгоритмы	Эвристические алгоритмы → Основанные на биологических принципах	Генетический алгоритм, Алгоритм стаи крилей, Алгоритм стада рыб, Биогеографический алгоритм, Алгоритм кукушки, Алгоритм симбиотических организмов
	Эвристические алгоритмы → Основанные на принципах роевого интеллекта	Оптимизация роя частиц, Алгоритм искусственной пчелиной колонии, Оптимизация муравьиной колонии, Алгоритм искусственной рыбьей стаи, Гравитационный поисковый алгоритм
	Эвристические алгоритмы → Основанные на математических принципах	Дифференциальная эволюция, Имитация отжига, Групповой поиск, Обучение на основе оптимизации, Синусно-косинусный алгоритм, Гармонический алгоритм поиска, Гравитационный поисковый алгоритм, Оптимизация с черной дырой, Электромагнитный метод
	Метаэвристические алгоритмы	Многокритериальная дифференциальная эволюция, Многокритериальная оптимизация, Модифицированное обучение с оптимизацией, Двойная дифференциальная эволюция с модификацией, Последовательное квадратичное программирование, Дифференциальная эволюция, Оптимизация роя частиц с гравитационным поиском, Несортированная многокритериальная оптимизация, Генетический алгоритм

2.1. Одноцелевые методы оптимизации

На протяжении многих лет использовалось несколько традиционных методов. Одним из традиционных подходов к решению задачи OPF является градиентный метод (GM – Gradient Method), который при использовании направления наискорейшего спуска демонстрирует низкую скорость сходимости. Задача ED рассматривалась в рамках линейного программирования (LP – Linear Programming) с учетом ограничений безопасности [11]. Целевая функция и ограничения представлялись в виде линейных моделей, и решение находилось с помощью симплекс-метода. Однако недостатком метода LP является то, что он может применяться только к задачам с линейными функциями и ограничениями.

Метод Ньютона применялся для задач управления реактивной мощностью с учетом разреженности сети, что позволяло находить более точные решения. Однако недостатком этого метода является его чувствительность к начальному приближению, что может привести к получению различных решений (частных постановок задачи OPF, связанных с управлением реактивной мощностью) при неверно выбранных начальных значениях.

Метод квадратичного программирования (QP – Quadratic Programming) был применен для решения задачи ED. Для оценки шага градиента QP не требует штрафных переменных и способен обрабатывать как равенства, так и неравенства. Однако у метода QP имеются ограничения, связанные с необходимостью аппроксимации квадратичных целевых функций и линейных ограничений.

Для решения задачи экономического распределения с учетом ограничений безопасности (SCED – Security Constrained Economic Dispatch) применялся метод внутренней точки (IP – Interior Point), который использует преимущества разложения Холецкого, что позволяет сократить время вычислений при поиске оптимума. Тем не менее метод IP ограничен выбором начальной точки, что может привести к невозможности нахождения допустимого решения.

Хотя классические методы могут обеспечивать почти оптимальные результаты для выпуклых задач OPF, в случае нелинейных задач их применение становится затруднительным [12]. Чтобы преодолеть ограничения традиционных подходов и получить более качественные оптимальные решения, были задокументированы эволюционные методы.

Эти методы являются популяционными и предлагают нахождение оптимальных решений путем корректной настройки управляющих параметров при приемлемой и разумной вычислительной нагрузке.

2.1.1. Генетический алгоритм

Генетический алгоритм (GA – Genetic Algorithm) основан на случайном выборе и моделировании процессов естественной генетики в популяции особей, где каждая особь представляет собой возможное решение задачи [13]. GA имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами:

1. GA сам обрабатывает кодирование множества решений.
2. Используется группа решений, а не одно решение поиска, что способствует повышению устойчивости GA и помогает избежать попадания в локальные минимумы, повышая вероятность достижения глобального оптимума.
3. GA основан на вероятностных операциях, тогда как традиционные подходы опираются на детерминированные правила переходов при оптимизации; следовательно, для GA не характерно использование строгих детерминированных правил.

4. ГА не требует предварительных знаний об ограничениях пространства поиска или особых характеристиках задачи, таких как выпуклость или существование производных.

С точки зрения стоимости и времени расчета оптимальные решения были получены для тестовой IEEE 30-шинной системы, при этом рост сложности генетического алгоритма приводит, как правило, к снижению издержек и уменьшению времени выполнения по сравнению с простыми методами. Однако недостатком ГА является то, что приспособленность популяции может оставаться постоянной в течение нескольких итераций до появления оптимального решения. ГА завершает работу после заданного количества поколений, и на последней итерации выбирается лучшее найденное решение. Если результаты не соответствуют допустимым пределам, ГА необходимо перезапустить с нуля.

2.1.2. Оптимизация роя частиц (PSO)

Оптимизация роя частиц (PSO – Particle Swarm Optimization) была разработана Кеннеди и Эберхартом [14] и основана на моделировании поведения стай птиц или косяков рыб. В PSO процедура поиска осуществляется в популяции, где отдельные особи, называемые агентами, представлены своими положениями в многомерном пространстве. Во время движения каждый агент корректирует свое положение на основе собственного опыта (называемого *pbest*) и опыта соседних агентов (называемого *gbest*).

Улучшенный PSO (IMPSO – Improved PSO), представленный в источнике [15], использует коэффициент сжатия (constriction factor) для повышения эффективности PSO. При этом подходе максимальная скорость V_{max} ограничена динамическим диапазоном параметра X_{max} . Результаты, полученные с использованием метода IMPSO с высоким коэффициентом сжатия, показали более высокую точность по сравнению с обычным PSO, что значительно способствует ускоренной сходимости к оптимальным значениям.

2.1.3. Дифференциальная эволюция (DE)

Дифференциальная эволюция (DE – Differential Evolution) была предложена Кеннетом В. Прайсом и Р. Сторном в 1995 году [16]. DE является одной из наиболее эффективных техник для оптимизации стохастических непрерывных параметров [17]. В отличие от традиционных алгоритмов, в DE новое поколение формируется путем масштабирования разностей между случайными членами популяции, без использования различных вероятностных распределений.

Еще одним преимуществом DE является уникальная система дифференциального оператора, применяемая для создания новых потомков из родительских хромосом, вместо традиционного кроссовера или мутации. Благодаря этому DE является самоадаптирующимся методом, а процесс селекции носит жадный (greedy) характер, выбирая лучшие характеристики как у новых решений, так и у их родителей, что позволяет DE избегать преждевременной сходимости.

Недостатком классического DE является то, что оператор селекции зависит от значения целевой функции. При сравнении двух допустимых решений выбирается то, которое имеет лучшее значение, но при сравнении допустимого и недопустимого решения DE не всегда отдает предпочтение допустимому решению. При сравнении двух недопустимых решений предпочтение отдается тому, которое нарушает ограничения в меньшей степени.

2.1.4. Алгоритм гравитационного поиска (GSA)

Алгоритм гравитационного поиска (GSA – Gravitational Search Algorithm) был разработан Рашеди в 2009 году [18] с целью решения задач оптимизации. GSA является агентной системой, основанной на законах Ньютона. Эта методика включает множество агентов, которые взаимодействуют друг с другом посредством гравитационных сил.

В GSA каждый агент имеет несколько параметров: положение, гравитационную и инерционную массу. Положение масс представляет собой решение задачи, а сами массы вычисляются на основе значений приспособленности (fitness). Сходимость алгоритма достигается за счет изменения гравитационных и инерционных масс, при этом самая тяжелая масса соответствует лучшему решению.

2.1.5. Алгоритм искусственной пчелиной колонии (ABC)

Алгоритм искусственной пчелиной колонии (ABC – Artificial Bee Colony) был разработан для решения задач оптимизации и основан на моделировании поведения пчел при поиске источников пищи. В этом алгоритме три типа пчел (работающие пчелы, наблюдающие пчелы и разведчики) сотрудничают между собой для поиска и использования наилучших источников пищи, что в задаче оптимизации соответствует поиску наилучших решений.

ABC обладает следующими особенностями:

1. Рабочие пчелы исследуют пространство решений, запоминая качество найденных решений (источников пищи).
2. Наблюдающие пчелы принимают решения о выборе источников пищи на основе информации, предоставляемой рабочими пчелами.
3. Разведчики исследуют новые области пространства решений, заменяя истощенные источники пищи на новые случайные решения.

В работах [19–22] алгоритм ABC применялся для решения OPF. Показано, что данный алгоритм эффективно справляется с различными целями оптимизации, включая минимизацию затрат на топливо, снижение потерь мощности, улучшение профиля напряжений и сокращение выбросов.

В источниках [19–22] также сообщается, что ABC показал высокую эффективность по сравнению с традиционными методами и другими эволюционными алгоритмами при решении задач OPF, обеспечивая более высокую точность и надежность получаемых результатов.

2.2. Многоцелевые задачи оптимизации

Многие задачи реального мира имеют несколько целевых функций, некоторые являются взаимно противоречивыми. Сложность достижения этих целей требует использования методов многокритериальной оптимизации для поиска глобального решения многоцелевых задач оптимизации (MOOP – Multi-Objective Optimization Problem). Ниже приведена общая форма записи MOOP, в которой несколько целей ограничены различными уравнениями и неравенствами [23]:

$$\min f(x, u) = [f_1(x, u), f_2(x, u), \dots, f_m(x, u), \dots, f_M(x, u)]^T, \quad (10)$$

$$s. t \begin{cases} g_i(x, u) = 0 & i = 1, 2, \dots, N \\ h_j(x, u) \leq 0 & j = 1, 2, \dots, O, \end{cases} \quad (11)$$

где $f_m(x, u)$ обозначает m -ю целевую функцию, а $g_i(x, u), h_j(x, u)$ – ограничения в виде равенств и неравенств соответственно; таким образом, многокритериальные задачи оптимизации решаются двумя различными способами.

2.2.1. Метод взвешенной суммы

Метод взвешенной суммы используется для преобразования задачи многокритериальной оптимизации оптимального распределения мощности (MOOPF – Multi-Objective Optimal Power Flow) в задачу с одной целевой функцией путем использования линейной комбинации различных целей. Как правило, выбранные целевые функции

находятся в противоречивых отношениях. Следовательно, необходимо определить решения, которые обеспечивают баланс или компромисс между выбранными целями. Модель целевой функции приведена ниже [24]:

$$\min f = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \dots + \lambda_m f_m + \dots + \lambda_M f_M, \quad (12)$$

где f_1, f_2, f_m, f_M обозначают конфликтующие целевые функции, а $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_m, \lambda_M$ представляют собой весовые коэффициенты; значения этих весов выбираются в зависимости от целевых функций.

2.2.2. Метод недоминирующей сортировки

Относительно всех целевых функций ни одно решение МООР не может считаться лучше другого. Если МООР имеет два решения, X_1 и X_2 , то эти решения удовлетворяют следующему критерию:

$$fm(X_1) \leq fm(X_2). \quad (13)$$

Таким образом, X_1 и X_2 классифицируются как недоминируемые и неплохие решения. С другой стороны, если уравнение (13) не выполняется всегда, такие решения считаются несубстантными. Проблема данного метода заключается в том, что для получения множества недоминируемых решений требуется множество пробных запусков.

2.3. Задача стохастической оптимизации распределения мощности

За последние несколько десятилетий основными источниками выработки электроэнергии были традиционные электростанции (например, тепловые, работающие на газе, мазуте или угле), которые являются причиной 35,29 % всех загрязняющих выбросов, ответственных за изменение климата и глобальное потепление.

Стремительный рост потребления электроэнергии, а также обеспокоенность по поводу истощения традиционных энергетических ресурсов привели к тому, что ученые сосредоточили внимание на ВИЭ. Возобновляемые источники энергии демонстрируют значительный потенциал в снижении потребления топлива и сокращении выбросов загрязняющих веществ в рамках национальных программ энергосбережения и уменьшения выбросов.

К концу 2024 года общая установленная мощность ВИЭ во всем мире, включая солнечную, ветровую, гидроэнергетику, геотермальную, морскую энергию, биогаз и другие, достигла 4 448 ГВт. Ожидается, что мировой рынок возобновляемой энергии будет продолжать расти в ближайшие годы со скоростью 4,22 % в год. Этот рост отражает глобальный переход к возобновляемым и устойчивым энергетическим технологиям.

Китай и США возглавляют мировой рынок солнечной энергетики, при этом именно в Китае наблюдается постоянное строительство новых объектов. Установленная генерирующая мощность электроэнергетического сектора в Африке составляет примерно 221 ГВт, но большая часть приходится на гидроэлектростанции, хотя солнечная энергетика (фотоэлектрические станции) и ветровая энергетика достигли значительного прогресса за последние два десятилетия благодаря своей низкой стоимости, экологической чистоте и доступности по сравнению с другими видами ВИЭ.

Предположения, ограничения и неопределенности, связанные с ВИЭ***Предположения:***

1. Возобновляемые источники энергии, работающие на солнечной и ветровой энергии, обладают предсказуемыми графиками доступности, которые могут быть смоделированы для интеграции в сеть.

2. Плавная интеграция ВИЭ в существующие электросети не вызовет серьезных сбоев благодаря гибкости и мощности текущих сетей.

3. Поддерживающая государственная политика, такая как субсидии и налоговые льготы для проектов в области ВИЭ, останется стабильной, способствуя их долгосрочному внедрению.

Ограничения:

1. Одним из ключевых ограничений является недостаточно развитая технология накопления энергии, что ограничивает возможность хранения и использования ВИЭ в периоды отсутствия генерации.

2. Географическая зависимость ВИЭ ограничивает их эффективность в регионах, где отсутствуют подходящие условия для солнечной или ветровой энергетики.

3. Высокая начальная стоимость развертывания крупномасштабных систем ВИЭ, включая модернизацию инфраструктуры и системы хранения энергии, создает финансовое ограничение.

4. Существующая сетевая инфраструктура может быть не полностью готова к работе с прерывистыми и распределенными ВИЭ, что ограничивает возможности их интеграции.

Неопределенности:

1. Изменение климата создает неопределенность в долгосрочной доступности и стабильности возобновляемых ресурсов, таких как ветер и солнечная энергия.

2. Колебания цен на энергию в результате изменений спроса, условий поставок и политики создают значительные экономические риски для инвесторов в ВИЭ.

3. Экономическая неопределенность, например, колебания цен на электроэнергию и изменения государственной политики, влияет на долгосрочную целесообразность и инвестиционную привлекательность проектов ВИЭ.

Тем не менее основными недостатками использования ветровой и солнечной энергии остаются их непредсказуемость и прерывистый характер, обусловленные изменением скорости ветра и солнечной радиации [25, 26].

Заключение

После тщательного обзора литературы по задачам ОРФ выявлены несколько существенных научных пробелов, которые требуют дальнейших исследований:

1. Необходимость разработки решений в реальном времени для управления динамическими неопределенностями генерации на основе ВИЭ.

2. Недостаточная проработка вопросов интеграции крупномасштабных систем накопления энергии в модели ОРФ.

3. Трудности масштабирования вычислительных алгоритмов для крупных энергосистем с разнообразными источниками энергии.

4. Недостаточная интеграция экономической динамики рынков в решения ОРФ.

5. Необходимость расширения экологических показателей в моделях ОРФ, включая анализ жизненного цикла.

6. Отсутствие разработанных моделей многокритериальной оптимизации, учитывающих технические, экономические и экологические факторы одновременно.

Методы, решающие задачи экономического распределения нагрузки и OPF, такие как PSO, гибридные GA, GSA и биоинспирированные алгоритмы, повышают надежность и точность расчетов. Несмотря на наличие сильных и слабых сторон, эти методы продемонстрировали многообещающие результаты при применении к крупномасштабным энергосетям, обеспечивая приемлемую точность при низких капитальных затратах.

Для задач с несколькими целями гибридные метаэвристические системы, такие как ESDE-MC, IGSA и PSO-DE, обеспечивают более эффективные решения, открывая новую эру развития энергетических систем с интеграцией ВИЭ [26].

Настоящее исследование представляет обзор методов OPF. В работе всесторонне проанализированы и сопоставлены методы OPF с различных точек зрения для формирования комплексного понимания проблемы, проанализированы различные постановки задач OPF и подходы к их решению.

Несмотря на достигнутый прогресс, остается несколько открытых научных вопросов, включая необходимость создания решений в реальном времени для управления динамическими неопределенностями ВИЭ, ограниченную интеграцию крупных систем накопления энергии, трудности масштабирования вычислительных алгоритмов для работы с разнообразными источниками энергии и недостаточный учет экономической динамики рынков в моделях OPF.

Кроме того, важными направлениями будущих исследований станут расширение экологических метрик, включая анализ жизненного цикла, и разработка многокритериальных моделей оптимизации, учитывающих технические, экономические и экологические аспекты. Решение этих задач будет критически важным для удовлетворения меняющихся требований современных энергосистем.

Будущие исследования могут быть направлены на использование методологий науки о данных, машинного обучения и мягких вычислений для дальнейшего решения задач OPF, повышения производительности систем за счет масштабируемости и параллелизма при реализации программного обеспечения в энергосистемах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dommel H.W., Tinney W.F. Optimal Power Flow Solutions // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1968. Vol. PAS-87, pp. 1866–1876.
2. Carpentier J. Contribution e l'étude do Dispatching Economique // *Bulletin de la Société Française des Electriciens*. 1962. No. 3, pp. 431–447.
3. Squires R.B. Economic Dispatch of Generation Directly from Power System Voltages Admittances // *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1961. Vol. PAS-79, pp. 1235–1245.
4. Sadat S.A., Sahraei A. Tuning Successive Linear Programming to Solve AC Optimal Power Flow Problem for Large Networks // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 137. Article 107807. URL: https://www.academia.edu/116633541/Tuning_Successive_Linear_Programming_to_Solve_AC_Optimal_Power_Flow_Problem_for_Large_Networks (дата обращения: 25.08.2025).
5. Huneault M., Galiana F.D. A Survey of the Optimal Power Flow Literature // *IEEE Transactions on Power Systems*. 1991. Vol. 6, pp. 762–770.
6. Duman S., Rivera S., Li J., Wu L. Optimal Power Flow of Power Systems with Controllable Wind-Photovoltaic Energy Systems via Differential Evolutionary Particle Swarm Optimization // *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2020. Vol. 30, pp. 1–28.

7. Корнеев К.Б., Павлова Ю.М., Осеи-Овусу Р. Управление рисками и надежностью в системах электроснабжения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 2 (10). С. 56–67.
8. Momoh A., Koessler R.J., Bond M.S., Stott B., Sun D., Papalexopoulos A., Ristanovic P. Challenges to Optimal Power Flow // *IEEE Transactions on Power Systems*. 1997. Vol. 12, pp. 444–455.
9. Boucekara H.R.E.H., Abido M.A., Chaib A., Mehasni R. Optimal Power Flow Using the League Championship Algorithm: A case study of the Algerian power system // *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 87, pp. 58–70.
10. Kessel P., Glavitsch H. Estimating the Voltage Stability of a Power System // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1986. Vol. 1, pp. 346–354.
11. Соколова Ю.М. Задача линейной оптимизации электрических сетей по критерию величины потока мощности. *Теоретические, экспериментальные и прикладные исследования молодых ученых Тверского государственного технического университета: Сборник научных трудов* / под ред. С.В. Рассадина. Тверь: ТвГТУ, 2017. С. 366–372.
12. Соколова Ю.М., Поясова А.С. Расчетные методы оптимизации конфигурации электрической сети с целью снижения потерь электроэнергии. *Теоретические, экспериментальные и прикладные исследования молодых ученых Тверского государственного технического университета: Сборник научных трудов* / под ред. С.В. Рассадина. Тверь: ТвГТУ, 2017. С. 193–197.
13. Sivanandam S.N., Deepa S.N. Introduction to Genetic Algorithms. Berlin/Heidelberg: Springer, 2006. 453 p.
14. Lee K.Y., El-Sharkawi M.A. Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and Applications to Power Systems. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008. 300 p.
15. Zhao B., Guo C.X., Cao Y.J. Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for OPF Problems // *IEEE Conference*. 2004. Vol. 4, pp. 7803–8718.
16. Bakirtzis A.G., Biskas P.N., Zoumas C.E., Petridis V. Optimal Power Flow by Enhanced Genetic Algorithm // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2002. Vol. 17, pp. 229–236.
17. Корнеев К.Б., Соколова Ю.М. Стохастический метод оптимизации конфигурации электрических сетей с перетоками мощности между разными уровнями напряжения // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. № 2 (30). С. 148–151.
18. Rashedi E., Nezamabadi-pour H., Saryazdi S. GSA: A Gravitational Search Algorithm // *Information Sciences*. 2009. Vol. 179, pp. 2232–2248.
19. Kursat A., Ulas K. Solution of Transient Stability-Constrained Optimal Power Flow Using Artificial Bee Colony Algorithm // *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 2013. Vol. 21, pp. 360–372.
20. Ayan K., Kılıç U. Artificial Bee Colony Algorithm Solution for Optimal Reactive Power Flow // *Applied Soft Computing*. 2012. Vol. 12, pp. 1477–1482.
21. Younes M. Hybrid Method for Optimal Power Flow Determination // *Science and Technology in Electrotechnics and Energy*. 2012. Vol. 3, pp. 249–258.
22. Li Y., Wang Y., Li B. A Hybrid Artificial Bee Colony Assisted Differential Evolution Algorithm for Optimal Reactive Power Flow // *Electric Power and Energy Systems*. 2013. Vol. 52, pp. 25–33.

23. Karaboga D. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization. Technical Report TR06. Turkey, Kayseri: Computer Engineering Department, Erciyes University, 2005. 10 p.
24. Qin H., Zhou J., Lu Y., Wang Y., Zhang Y. Multi-Objective Differential Evolution with Adaptive Cauchy Mutation for Short-Term Multi-Objective Optimal Hydrothermal Scheduling // *Energy Conversion and Management*. 2010. Vol. 51, pp. 788–794.
25. Warid W. Optimal Power Flow Using the AMTPG-Jaya Algorithm // *Applied Soft Computing*. 2020. Vol. 91. Article 106252. URL: https://www.academia.edu/73056915/Optimal_Power_Flow_Using_the_Jaya_Algorithm (дата обращения: 25.08.2025).
26. Guvenc U., Duman S., Kahraman H.T., Aras S., Kati M. Fitness-Distance Balance Based Adaptive Guided Differential Evolution Algorithm for Security-Constrained Optimal Power Flow Problem Incorporating Renewable Energy Sources // *Applied Soft Computing*. 2021. Vol. 108, pp. 1–35.
27. Owusu P.A., Sarkodie A., Dubey S. A Review of Renewable Energy Sources, Sustainability Issues and Climate Change Mitigation // *Cogent Engineering*. 2016. Vol. 3. Article 1167990, pp. 1–14.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПАВЛОВА Юлия Михайловна – доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Павлова Ю.М., Корнеев К.Б., Корнеев В.К. Эволюционные алгоритмы для оптимального энергопотребления: всесторонний обзор и анализ // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 4 (28). С. 54–67.

EVOLUTIONARY ALGORITHMS FOR OPTIMAL ENERGY CONSUMPTION: A COMPREHENSIVE REVIEW AND ANALYSIS

Pavlova Yu.M.¹, Korneev K.B.¹, Korneev V.K.²

¹*Tver State Technical University (Tver)*

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

Abstract. This paper presents a detailed review of various OPF problems and the wide range of algorithms – both traditional and evolutionary – employed to solve them, with a particular focus on the integration of wind energy and multi-objective optimization strategies.

Keywords: Optimal power flow, Classical algorithms, Evolutionary algorithms, Multi-objective problems, Renewable energy sources

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

PAVLOVA Yulia Mikhailovna – Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

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

KORNEEV Victor Konstantinovich – Student, University of Science and Technology, 4, Building 1, Leninsky Prospekt Moscow, 119049, Russia. E-mail: korneyev.viktor@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Pavlova Yu.M., Korneev K.B., Korneev V.K. Evolutionary algorithms for optimal energy consumption: a comprehensive review and analysis // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 54–67.

УДК 629.7.052

ДОПОЛНЕНИЕ К ТЕОРЕМЕ О ЛИНИЯХ n -СИММЕТРИИ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ

Ал.А. Шум¹, А.М. Ветошкин²

¹ *Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

² *Мытищинский филиал Московского государственного
технического университета им. Н.Э. Баумана
(г. Мытищи, Московская область)*

© Шум Ал.А., Ветошкин А.М., 2025

Аннотация. Статья является продолжением предыдущей статьи этих же авторов, в которой была доказана следующая теорема: момент n -ного порядка выпуклой плоской пластины относительно прямой L , проводимой параллельно заданной прямой, достигает наименьшего значения тогда, когда прямая L представляет собой линию $(n - 1)$ -симметрии пластины. В данной статье утверждение этой теоремы распространяется со случая выпуклой пластины на общий случай произвольной плоской пластины.

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

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-67-77

ВВЕДЕНИЕ

Существует много книг и статей, посвященных описанию разнообразных методов обработки деталей машин (см., например, работы [1–13]). Чтобы при изготовлении и обработке детали электрической машины сделать оптимальный выбор из длинного списка соответствующих методов и технологий, необходимо учитывать распределение массы внутри детали. Это распределение описывается соответствующей функцией плотности, и потому изучение ее свойств, особенно в тех случаях, когда эта функция, а значит и соответствующая деталь, имеет симметрию того или иного вида, представляет интерес для исследователей. В статье [22] с точки зрения вопросов симметрии изучался *линейный стержень*, т.е. одномерная деталь, имеющая функцию плотности, зависящую от одной переменной. В работах [14–17, 20, 23] подобным образом изучались *пластины*, т.е. плоские детали, имеющие функцию плотности, зависящую от двух переменных. Наконец, в статьях [18, 19] в качестве деталей выступали пространственные тела с функцией плотности, зависящей от трех переменных.

Настоящая статья продолжает исследования плоских пластин и представляет собой продолжение работы [23]. В работе [23] была установлена полезная теорема о линиях n -симметрии выпуклой пластины. В настоящей статье утверждение этой теоремы распространяется на более общий случай произвольной плоской пластины.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБОСНОВАНИЯ

Рассматривается плоскость вместе с заданной на ней прямоугольной декартовой системой координат. *Простой областью* называется всякая область этой плоскости, граница которой представляет собой замкнутую линию без самопересечений (при этом граница области считается частью области и, таким образом, всякая простая область *замкнута*). Точки простой области, не лежащие на ее границе, являются *внутренними* точками этой области. Простая область называется *выпуклой*, если всякая прямая, проведенная через любую ее внутреннюю точку, пересекает границу данной области ровно в двух точках. Под *областью* понимается простая область или объединение нескольких простых областей. Область S_1 является *подобластью* области S , если $S_1 \subseteq S$. Область S вместе с определенной в ней непрерывной неотрицательной функцией двух переменных $f(x, y)$ представляет собой *пластину* D , при этом функция $f(x, y)$ рассматривается как *функция плотности* пластины D и кратко именуется *плотностью*. Подобласть области S вместе с соответствующим ограничением функции $f(x, y)$ называется *подпластиной* пластины D . Пластина D является *выпуклой*, если соответствующая область S выпукла. Пластина D является *связной*, если соответствующая область S простая. В случае, когда область пластины не является простой, пластина называется *составной* (следует отметить, что в источнике [23] под *пластинами* понимались *связные пластины*, поскольку составные пластины не рассматривались).

Следующие определения были подробно рассмотрены в работе [23].

Пусть имеются прямая L и пластина D с областью S и функцией плотности $f(x, y)$. Если n – целое неотрицательное число, то *моментом n -го порядка пластины D относительно прямой L* называется

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

где $r(x, y)$ – расстояние от точки (x, y) до прямой L (следует отметить, что значение момента $M_n(D)$ не зависит от выбора системы координат, поскольку функция плотности и функция $r(x, y)$ при заданной прямой L являются функциями точки пластины).

Частные случаи этого определения, отвечающие значениям $n = 0$, $n = 1$, $n = 2$, соответствуют традиционным определениям из учебника [24]: $M_0(D)$ представляет собой массу пластины D (вне зависимости от положения прямой L), $M_1(D)$ – статический момент относительно прямой L , $M_2(D)$ – момент инерции относительно прямой L . (Требование к функции плотности, состоящее в том, что масса любой пластины и массы всех ее подпластин должны быть больше нуля, принятое в статьях [16, 23], сохраняется и в настоящей работе).

Прямая L , делящая пластину D на две подпластины D_1 и D_2 , называется *линией n -симметрии пластины D* , если $M_n(D_1) = M_n(D_2)$. Частные случаи этого определения, отвечающие значениям $n = 0$ и $n = 1$, соответствуют известным понятиям (см. статьи [16, 23]): линии 0-симметрии – это *линии полумасс (линии s -симметрии)*, а линии 1-симметрии – это *линии равновесия (линии c -симметрии)*. Напомним, что точка пересечения всех линий равновесия представляет собой *центр масс* (в смысле традиционного определения из учебника [24]), а точка пересечения всех линий полумасс – *центр полумасс* (в смысле определений из статей [16, 23]). Как известно, центр масс всегда существует, в то время как центр полумасс может не существовать. В работе [14] было показано, что в случае, когда существуют оба эти центра, они могут не совпадать.

В работе [16] установлено, что *для всякого целого неотрицательного числа n , любой пластины D и произвольно проведенной прямой существует единственная линия n -симметрии пластины D , параллельная заданной прямой*.

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

В работе [23] эта теорема доказана для случая, когда пластина D выпукла. Цель настоящей работы – доказать данную теорему для случая произвольной связной плоской пластины D . Доказательство будет построено по той же схеме, что и доказательство в работе [23], и так же будет опираться на следующую вспомогательную лемму, установленную в работе [22]:

Лемма 1. *Если функция $f(x)$ непрерывна и $n > 0$, то*

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

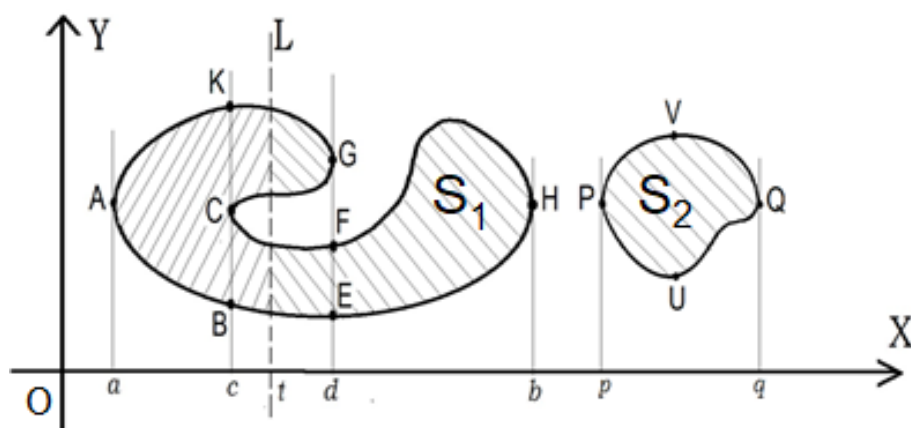
Кроме того, для доказательства теоремы удобно будет выделить следующее очевидное утверждение:

Лемма 2. *Если функция $f(x)$ непрерывна и $n > 0$, то*

$$a) \left(\int_a^b (t-x)^n f(x) dx \right)' = n \int_a^b (t-x)^{n-1} f(x) dx, \quad б) \left(\int_a^b (x-t)^n f(x) dx \right)' = -n \int_a^b (x-t)^{n-1} f(x) dx.$$

Доказательство теоремы.

Рассмотрим пластину D с областью S произвольной формы. Чтобы сделать наши общие рассуждения более наглядными, будем сопровождать их конкретным примером области S – именно тем, который представлен на рисунке. В этом примере область S является составной и состоит из двух связанных компонент (заметим, что увеличение компонент связности ничего принципиально нового не привнесет). Если провести прямую, пересекающую область S , то в точке пересечения линии границы с прямой, как правило (но не всегда), линия границы переходит с одной стороны прямой на другую. Точку пересечения прямой и линии границы будем называть *особой*, если в некоторой окрестности этой точки линия границы остается по одну сторону от прямой. Так, на рисунке особыми точками являются точки пересечения A, C, G, H, P, Q , в то время как точки пересечения B, K, E и F особыми не являются.



Область S и прямая L , разбивающая область S на подобласти S_1 и S_2

Так же, как и в доказательстве из источника [23], будем считать, что та прямая, параллельно которой проводится прямая L , есть ось OY заданной на плоскости прямоугольной декартовой системы координат (очевидно, что это предположение не ограничивает общности наших рассуждений). Пусть прямая L , разбивающая пластину D на две подпластины D_1 и D_2 и, соответственно, область S на две подобласти S_1 и S_2 , проходит через точку t на оси OX . На рисунке прямая L проведена пунктиром, а области S_1 и S_2 показаны разнонаправленной штриховкой (при этом область S_1 простая, но не выпуклая, а область S_2 является составной: она состоит из трех связанных компонент). Момент n -го порядка пластины D относительно прямой L может быть записан в следующем виде:

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

Очевидно, $M_n(D)$ оказывается функцией, зависящей от переменной t : $M_n(D) = M_n(t)$. Легко видеть, что эта функция определена и непрерывна на всей числовой оси:

$$M_n(t) = \iint_{S_1} (t-x)^n f(x,y) dx dy + \iint_{S_2} (x-t)^n f(x,y) dx dy.$$

Заметим, что в этом представлении функции $M_n(t)$ области интегрирования S_1 и S_2 с изменением переменной t меняют свои очертания; так, например, при $t < a$ будет $S_1 = \emptyset$ и $S_2 = S$, а при $t > q$ будет $S_1 = S$ и $S_2 = \emptyset$. Для того чтобы выяснить, при каком положении прямой L момент $M_n(D)$ достигает наименьшего значения, функцию $M_n(t)$ нужно исследовать на экстремум при помощи производной, но, чтобы выполнить такое исследование, необходимо получить более детальное представление этой функции.

Будем рассматривать вертикальные (т.е. параллельные оси OY) прямые, пересекающие область S . Выделим из них те, которые имеют хотя бы одну особую точку пересечения с линией границы области S , и проведем их (на рисунке такие прямые проведены сплошными тонкими линиями). Точки пересечения этих линий с осью OX вместе с концами отрезков, представляющих собой проекции компонент связности области S на ось OX , определяют разбиение оси OX на промежутки. Так, в примере с областью S на рисунке ось OX разбивается на следующие промежутки: $(-\infty; a]$, $[a; c]$, $[c; d]$, $[d; b]$, $[b; p]$, $[p; q]$, $[q; +\infty)$. Теперь, переходя к более подробному представлению функции $M_n(t)$, будем отдельно записывать ее для каждого промежутка полученного разбиения числовой оси. Переведем двойные интегралы в повторные так, что внешние интегралы по переменной x будем брать отдельно по каждому из отрезков разбиения (при этом дополнительной точкой деления оси на промежутки будет выступать точка, определяемая значением текущей переменной t). Тогда при отыскании производной этой функции окажется возможным применить лемму из работы [22] тем же образом, что и в доказательстве, приведенном в работе [23]. Поясним этот общий тезис на примере области S , показанной на рисунке. Предположим, что границы области S заданы непрерывными функциями следующим образом:

дуга АВ – функцией $y = \varphi_1(x)$,	дуга АК – функцией $y = \varphi_2(x)$,
дуга BE – функцией $y = \psi_1(x)$,	дуга CF – функцией $y = \psi_2(x)$,
дуга CG – функцией $y = \eta_1(x)$,	дуга KG – функцией $y = \eta_2(x)$,
дуга EH – функцией $y = \lambda_1(x)$,	дуга FH – функцией $y = \lambda_2(x)$,
дуга PUQ – функцией $y = \xi_1(x)$,	дуга PVQ – функцией $y = \xi_2(x)$.

На каждом из семи промежутков $(-\infty; a]$, $[a; c]$, $[c; d]$, $[d; b]$, $[b; p]$, $[p; q]$, $[q; +\infty)$ представление функции $M_n(t)$ в виде суммы повторных двойных интегралов будет выглядеть по-своему. Запишем такое представление для отрезка $[c; d]$.

Поскольку $M_n(t) = M_n(D_1) + M_n(D_2) = \iint_{S_1} (t-x)^n f(x,y) dx dy + \iint_{S_2} (x-t)^n f(x,y) dx dy$, можно

записать необходимое представление для каждого слагаемого отдельно:

$$M_n(D_1) = \iint_{S_1} (t-x)^n f(x,y) dx dy =$$

$$= \int_a^c dx \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} (t-x)^n f(x,y) dy + \int_c^t dx \int_{\psi_1(x)}^{\psi_2(x)} (t-x)^n f(x,y) dy + \int_c^t dx \int_{\eta_1(x)}^{\eta_2(x)} (t-x)^n f(x,y) dy =$$

$$= \int_a^c (t-x)^n dx \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} f(x,y) dy + \int_c^t (t-x)^n \left[\int_{\psi_1(x)}^{\psi_2(x)} f(x,y) dy + \int_{\eta_1(x)}^{\eta_2(x)} f(x,y) dy \right] dx =$$

$$= \int_a^c (t-x)^n F_1(x) dx + \int_c^t (t-x)^n F_2(x) dx,$$

где $F_1(x) = \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} f(x,y) dy$, $F_2(x) = \int_{\psi_1(x)}^{\psi_2(x)} f(x,y) dy + \int_{\eta_1(x)}^{\eta_2(x)} f(x,y) dy$,

$$M_n(D_2) = \iint_{S_2} (x-t)^n f(x,y) dx dy = \int_t^d dx \int_{\psi_1(x)}^{\psi_2(x)} (x-t)^n f(x,y) dy +$$

$$+ \int_t^d dx \int_{\eta_1(x)}^{\eta_2(x)} (x-t)^n f(x,y) dy + \int_d^b dx \int_{\lambda_1(x)}^{\lambda_2(x)} (x-t)^n f(x,y) dy + \int_p^q dx \int_{\xi_1(x)}^{\xi_2(x)} (x-t)^n f(x,y) dy =$$

$$= \int_t^d (x-t)^n \left[\int_{\psi_1(x)}^{\psi_2(x)} f(x,y) dy + \int_{\eta_1(x)}^{\eta_2(x)} f(x,y) dy \right] dx + \int_d^b (x-t)^n dx \int_{\lambda_1(x)}^{\lambda_2(x)} f(x,y) dy + \int_p^q (x-t)^n dx \int_{\xi_1(x)}^{\xi_2(x)} f(x,y) dy =$$

$$= \int_t^d (x-t)^n F_3(x) dx + \int_d^b (x-t)^n F_4(x) dx + \int_p^q (x-t)^n F_5(x) dx,$$

где $F_3(x) = \int_{\psi_1(x)}^{\psi_2(x)} f(x,y) dy + \int_{\eta_1(x)}^{\eta_2(x)} f(x,y) dy$, $F_4(x) = \int_{\lambda_1(x)}^{\lambda_2(x)} f(x,y) dy$, $F_5(x) = \int_{\xi_1(x)}^{\xi_2(x)} f(x,y) dy$.

Производная функции $M_n(t)$ также разбивается на два слагаемых:

$$M_n'(t) = (M_n(D_1))' + (M_n(D_2))'.$$

Вычислим первое из них, применяя леммы 1а и 2а:

$$(M_n(D_1))' = \left(\int_a^c (t-x)^n F_1(x) dx + \int_c^t (t-x)^n F_2(x) dx \right)' = n \int_a^c (t-x)^{n-1} F_1(x) dx + n \int_c^t (t-x)^{n-1} F_2(x) dx =$$

$$= -n \int_a^c (t-x)^{n-1} \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} f(x,y) dy dx + n \int_c^t (t-x)^{n-1} \left[\int_{\psi_1(x)}^{\psi_2(x)} f(x,y) dy + \int_{\eta_1(x)}^{\eta_2(x)} f(x,y) dy \right] dx =$$

$$= n \iint_{S_1} (t-x)^{n-1} f(x,y) dx dy = n M_{n-1}(D_1).$$

Вычислим второе слагаемое, применяя леммы 1б и 2б:

$$(M_n(D_2))' = \left(\int_t^d (x-t)^n F_3(x) dx + \int_d^b (x-t)^n F_4(x) dx + \int_p^q (x-t)^n F_5(x) dx \right)' =$$

$$= \left(- \int_d^t (x-t)^n F_3(x) dx + \int_d^b (x-t)^n F_4(x) dx + \int_p^q (x-t)^n F_5(x) dx \right)' =$$

$$= n \int_d^t (x-t)^{n-1} F_3(x) dx - n \int_d^b (x-t)^{n-1} F_4(x) dx - n \int_p^q (x-t)^{n-1} F_5(x) dx =$$

$$\begin{aligned}
&= -n \int_t^d (x-t)^{n-1} F_3(x) dx - n \int_d^b (x-t)^{n-1} F_4(x) dx - n \int_p^q (x-t)^{n-1} F_5(x) dx = \\
&= -n \int_t^d (x-t)^{n-1} \left[\int_{\psi_1(x)}^{\psi_2(x)} f(x, y) dy + \int_{\eta_1(x)}^{\eta_2(x)} f(x, y) dy \right] dx - \\
&- n \int_d^b (x-t)^{n-1} \int_{\lambda_1(x)}^{\lambda_2(x)} f(x, y) dy dx - n \int_p^q (x-t)^{n-1} \int_{\xi_1(x)}^{\xi_2(x)} f(x, y) dy dx = \\
&= -n \iint_{S_2} (x-t)^{n-1} f(x, y) dx dy = -n M_{n-1}(D_2).
\end{aligned}$$

Таким образом, получены два соотношения:

$$(M_n(D_1))' = n M_{n-1}(D_1), \quad (1)$$

$$(M_n(D_2))' = -n M_{n-1}(D_2). \quad (2)$$

Сложив их, находим:

$$M_n'(t) = n[M_{n-1}(D_1) - M_{n-1}(D_2)]. \quad (3)$$

Справедливость равенства (3) установлена для интервала $(c; d)$. Чтобы убедиться в том, что это равенство выполнено и для других интервалов, нужно для каждого из них преобразовать слагаемые, составляющие функцию $M_n(t)$, переведя двойные интегралы в повторные, и затем, применяя леммы 1 и 2, найти производные.

Запишем, например, представление функции $M_n(t)$ для отрезка $[d; b]$ (теперь вертикальная прямая L должна пересекать ось OX между точками d и b).

$$\begin{aligned}
M_n(t) &= \iint_{S_1} (t-x)^n f(x, y) dx dy + \iint_{S_2} (x-t)^n f(x, y) dx dy = M_n(D_1) + M_n(D_2), \\
M_n(D_1) &= \int_a^c dx \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} (t-x)^n f(x, y) dy + \int_c^d dx \int_{\psi_1(x)}^{\psi_2(x)} (t-x)^n f(x, y) dy + \int_c^d dx \int_{\eta_1(x)}^{\eta_2(x)} (t-x)^n f(x, y) dy, \\
M_n(D_2) &= \int_d^t dx \int_{\lambda_1(x)}^{\lambda_2(x)} (x-t)^n f(x, y) dy + \int_t^b dx \int_{\lambda_1(x)}^{\lambda_2(x)} (x-t)^n f(x, y) dy + \int_p^q dx \int_{\xi_1(x)}^{\xi_2(x)} (x-t)^n f(x, y) dy.
\end{aligned}$$

Дальнейшие рассуждения, связанные с отысканием производных и доказательством равенства (3) для интервала $(d; b)$, могут быть выполнены по той же схеме, что и в рассмотренном случае для интервала $(c; d)$.

Таким образом можно установить справедливость соотношения (3) для каждого из интервалов $(-\infty; a)$, $(a; c)$, $(c; d)$, $(d; b)$, $(b; p)$, $(p; q)$, $(q; +\infty)$. Выполнение равенства (3) в концах этих интервалов можно установить, опираясь на следующий простой факт из математического анализа: *если непрерывная функция имеет в некоторой точке равные односторонние производные, то ее обычная производная в этой точке существует и равна общему значению односторонних производных.*

Таким образом, соотношение (3) определяет производную функции $M_n(t)$ на всей числовой оси, и потому его удобно использовать для исследования функции $M_n(t)$ на экстремум. Приравнявая $M_n'(t)$ нулю, находим, что экстремум функции

$M_n(t)$ приходится на то положение прямой L , при котором $M_{n-1}(D_1) = M_{n-1}(D_2)$, но это и значит, что прямая L является линией $(n-1)$ -симметрии пластины D .

Продолжая исследование функции $M_n(t)$, найдем ее вторую производную:

$$M_n''(t) = (nM_{n-1}(D_1) - nM_{n-1}(D_2))' = n(M_{n-1}(D_1))' - n(M_{n-1}(D_2))'.$$

В силу (1) и (2): $(M_{n-1}(D_1))' = (n-1)M_{n-2}(D_1)$, $(M_{n-1}(D_2))' = -(n-1)M_{n-2}(D_2)$.

Отсюда следует, что

$$M_n''(t) = n(n-1)[M_{n-2}(D_1) + M_{n-2}(D_2)]. \quad (4)$$

Это выражение при $n \geq 2$ и любом значении t очевидно больше нуля, что означает, что график функции $M_n(t)$ всюду вогнут, и потому найденный экстремум единственен и представляет собой минимум.

Этим теорема доказана для всех $n \geq 2$. Случай $n = 1$ рассмотрим отдельно.

Соотношение (3) будет выполнено при любом $n > 0$. Подставляя в это соотношение $n = 1$, получаем:

$$M_1'(t) = M_0(D_1) - M_0(D_2) = \iint_{S_1} f(x, y) dx dy - \iint_{S_2} f(x, y) dx dy.$$

С ростом значений переменной t область S_1 может только увеличиваться, а область S_2 – только уменьшаться, поэтому и первое слагаемое в записанной разности двух двойных интегралов с ростом значений переменной t может только увеличиваться, а второе (по абсолютной величине) – только уменьшаться. Это значит, что $M_1'(t)$ – неубывающая функция. Кроме того, функция $M_1'(t)$ очевидным образом является непрерывной. Поскольку $M_1'(a) = -m(D) < 0$ и $M_1'(q) = m(D) > 0$, то где-то в интервале $(a; q)$ найдется точка $x = t_0$ такая, что $M_1'(t_0) = 0$. Левее этой точки $M_1'(t) \leq 0$, и поэтому функция $M_1(t)$ может только убывать или оставаться постоянной. Правее ее $M_1'(t) \geq 0$, и поэтому функция $M_1(t)$ может только возрастать или оставаться постоянной. Следовательно, в точке t_0 функция $M_1(t)$ достигает своего наименьшего значения. В то же время, поскольку $M_0(D_1) = M_0(D_2)$, вертикальная прямая, проведенная через эту точку, будет линией 0-симметрии (линией полумасс) пластины D . Таким образом, и в случае $n = 1$ теорема оказывается выполненной. Однако при этом точка t_0 может и не быть точкой экстремума, поскольку она может принадлежать некоторому отрезку, в каждой точке которого $M_1'(t) = 0$. В этом случае для пластины D существует бесконечно много линий 0-симметрии (линий полумасс).

Доказательство теоремы закончено. Хотя это доказательство опиралось на конкретный пример пластины D , легко видеть, что рассуждения, доказывающие теорему в этом случае, без каких либо проблем переносятся на случай любой другой плоской пластины. При таком переносе может увеличиваться число слагаемых в представлении функции $M_n(t)$, но принципиальных трудностей не возникает.

В дополнение к приведенному доказательству следует сделать важное замечание. В работе [16] доказано, что для любого целого неотрицательного числа n и произвольной

связной пластины D существует единственная линия n -симметрии этой пластины, параллельная данной прямой. Как следует из рассмотренных рассуждений, при $n > 0$ это утверждение переносится и на составные пластины, но при $n = 0$ для составных пластин оно может не выполняться. Линия 0-симметрии (линия полумасс) всегда существует, но таких линий может быть бесконечно много. Например, в случае, когда пластина состоит из двух компонент связности одинаковой массы, всякая прямая, проведенная между этими компонентами и не задевающая ни одной из них, будет линией 0-симметрии (линией полумасс) данной пластины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение линий n -симметрии для произвольного целого неотрицательного n позволяет иметь в обиходе общее понятие n -симметрии и изучать целый спектр симметрий с единой точки зрения. Такой подход, с одной стороны, дает возможность переносить частные результаты, полученные для s -симметрии и c -симметрии, на общий случай n -симметрии (см., например, источники [16, 17]) и, с другой стороны, применять доказанные общие утверждения к интересным с практической точки зрения частным случаям. Так, частными случаями доказанной в настоящей статье общей теоремы являются следующие полезные факты:

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

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

Теорема, рассмотренная в данной статье, представляет собой обобщение теоремы, доказанной в работе [23] для случая выпуклой пластины, на случай произвольной плоской пластины. Поэтому и приведенные утверждения являются более общими в сравнении с аналогичными утверждениями, которыми заканчивается работа [23].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожжалова В.И., Седыхин Ф.В., Смоленцев В.П., Ямпольский В.М. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учебное пособие в 2 т. М.: Высшая школа, 1983. Т. 1. 247 с. Т. 2. 208 с.
2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
3. Вороничев Н.М., Тартаковский Ж.Э., Генин В.Б. Автоматические линии из агрегатных станков. М.: Машиностроение, 1979. 487 с.
4. Дальский А.М., Гаврилюк В.С. Механическая обработка материалов: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1981. 266 с.
5. Немилов Е.Ф. Электроэрозионная обработка материалов. Л.: Машиностроение, 1983. 160 с.
6. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М.: Машиностроение, 1977. 303 с.
7. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
8. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение, 1989. 297 с.
9. Трент Е.М. Резание металлов. М.: Машиностроение, 1980. 263 с.

10. Участки для электроэрозионной обработки рабочих деталей вырубных штампов и прессформ. М.: ОНТИ ЭНИМС, 1983. 47 с.
11. Этин А.О. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийным инструментом. М.: Машгиз, 1953. 173 с.
12. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании. М.: Машиностроение-1, 2004. 230 с.
13. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Мн.: Новое знание, 2006. 512 с.
14. Шум Ал.А. О центрах симметрии функции двух переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. Вып. 30. С. 19–23.
15. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Замечание о центрах s -симметрии и s -симметрии плоской пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 63–70.
16. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Моменты плоской пластины относительно прямой и некоторые вопросы симметрии // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 2 (10). С. 78–84.
17. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О центрах симметрии плоской выпуклой пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 3 (11). С. 65–72.
18. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О понятии n -симметрии пространственного тела // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 3 (15). С. 66–72.
19. Шум Ал.А., Ветошкин А.М. О центрах симметрии выпуклого пространственного тела // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 2 (18). С. 64–72.
20. Шум Ал.А., Ветошкин А.М. Теорема о центре n -симметрии плоской выпуклой пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 3 (19). С. 75–82.
21. Шум Ал.А., Ветошкин А.М. Теорема о центре n -симметрии выпуклого пространственного тела // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 4 (20). С. 76–82.
22. Шум Ал.А., Ветошкин А.М. Заметка об n -симметрии линейного стержня // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 2 (22). С. 63–71.
23. Шум Ал.А., Ветошкин А.М. Теорема о линиях n -симметрии выпуклой плоской пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 1 (25). С. 74–82.
24. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: учебник в 3 т. М.: ФИЗ-МАТЛИТ, 2001. Т. 3. 662 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Шум Ал.А., Ветошкин А.М. Дополнение к теореме о линиях n -симметрии плоской пластины // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 4 (28). С. 67–77.

**ADDITION TO THE THEOREM
ON THE n -SYMMETRY LINES OF A FLAT PLATE**

Al.A. Shum¹, A.M. Vetoshkin²

¹ *Tver State Technical University (Tver)*

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

Abstract. The article is a continuation of the previous article by the same authors, in which the following theorem was proved: the moment of the n -th order of a convex flat plate relative to a straight line L , drawn parallel to a given straight line, reaches the smallest value when the straight line L is a line of $(n - 1)$ -symmetry of this plate. In this article, the validity of this theorem is extended from the case of a convex plate to the general case of an arbitrary flat plate.

Keywords: moment of n -th order, line of n -symmetry, half-mass line, equilibrium line, flat plate, density function, mass, center of mass, electric machine.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Shum Al.A., Vetoshkin A.M. Addition to the theorem on the n -symmetry lines of a flat plate // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 67–77.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 544.773.2

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА ГАЗОВОЙ ФАЗЫ РЕАКЦИОННОЙ МАССЫ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА ФОРМАЛЬДЕГИДА И ЕГО ПРОИЗВОДНЫХ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИЕЙ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

*А.А. Курагин, А.И. Пичугина, Е.И. Лагусева, А.В. Старовойтов,
К.В. Чалов, В.Ю. Долуда*

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Курагин А.А., Пичугина А.И., Лагусева Е.И.,
Старовойтов А.В., Чалов К.В., Долуда В.Ю., 2025

Аннотация. В статье приводятся результаты разработки хроматографического метода аналитического контроля продуктов реакции получения формальдегида путем трансформации диоксида углерода. Для проведения исследований использовался газовый хроматограф «Кристаллюкс-4000М» с установленной насадочной колонкой длиной 5 м и внутренним диаметром 2 мм, заполненной сорбентом MN-270 с фракцией 70–120 мкм. Показано, что в состав газовой фазы реакционной среды входят водород, метан, монооксид и диоксид углерода, формальдегид, метанол, диметиловый эфир, метилаль, триоксан. Определено влияние температуры, линейной скорости газа-носителя на эффективность проведения анализа, время выходов компонентов. Увеличение температуры колонки приводит к уменьшению времени анализа с 15 до 10 мин, а также к уменьшению селективности разделения хроматографических пиков. Линейная скорость газа-носителя также оказывает существенное влияние на эффективность разделения компонентов анализируемой смеси, при этом максимальные коэффициенты разделения хроматографических пиков достигаются при 0,25–0,28 см/мин. По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о необходимости использования режима программирования температур для обеспечения высокой селективности разделения отдельных веществ.

Ключевые слова: формальдегид, хроматография, анализ, условия анализа, температура, линейная скорость, селективность разделения

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-78-84

ВВЕДЕНИЕ

Аналитическое сопровождение химико-технологических процессов представляет собой важную научно-техническую задачу современной аналитической химии, включающей как разработку новых методов анализа химических веществ, так и модификацию уже существующих под нужды конкретного заказчика. Формальдегид широко используется в различных производственных процессах. На сегодняшний день

разработано достаточно много методов его аналитического контроля [1–6], однако ни один из них не обеспечивает необходимой степени разделения и малого эффективного времени анализа в случае необходимости определения содержания как самого формальдегида, так и его производных. В связи с этим в данной работе приведены результаты разработки хроматографического анализа позволяющего решить вышеуказанную проблему.

МЕТОДЫ, МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ

Реакционная масса трансформации диоксида углерода с образованием формальдегида и его производных представляет собой жидкую фазу, содержащую метанол или другие спирты, продукты реакции, а также газовую фазу, включающую смесь диоксида и монооксида углерода, метана, формальдегида, метанола, диметилового эфира, метилала, триоксана. Для введения в колонку газового потока использовался обогреваемый кран-дозатор, работающий при температуре 150 °С. Введение газов осуществлялось из мерной газовой бюретки. Анализ газовой фазы проводился с использованием хроматографа «Кристаллюкс-4000М», снабженного насадочной колонкой длиной 5 м и внутренним диаметром 2 мм, заполненной сорбентом MN-270 фракцией 70–120 мкм. В ходе выполнения анализов температура термостата колонки варьировалась в диапазоне 40–160 °С, а линейная скорость газа-носителя (гелий) в колонке – от 0,21 до 0,48 см/с. Детектирование пиков осуществлялось с использованием детектора по теплопроводности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В реакционной газовой смеси были обнаружены следующие компоненты: водород, монооксид и диоксид углерода, формальдегид, метанол, диметиловый эфир, триоксан, метилаль. Исследование влияния температуры на время выхода отдельных компонентов приведено на рис. 1. Увеличение температуры с 40 до 160 °С способствует существенному уменьшению времени выхода как легких компонентов реакционной массы, так и ее тяжелых компонентов (рис. 1).

При этом разделение в изотермическом режиме при высоких температурах приводит к частичному перекрыванию пиков компонентов реакционной смеси, а потому необходимо использование градиента температур термостата хроматографической колонки для достижения приемлемого разделения и малого времени проведения единичного анализа.

Изучение влияния линейной скорости подачи газа-носителя в хроматографическую колонку на селективность разделения компонентов реакционной смеси приведен на рис. 2. Увеличение линейной скорости потока газа-носителя с 0,21 см/мин до 0,32 см/мин сопровождается ростом фактора разделения для всех компонентов смеси с достижением максимальных значений селективности разделения веществ, равных 2–4. Дальнейшее возрастание линейной скорости газа-носителя до 0,48 см/мин приводит к уменьшению селективности разделения анализируемых компонентов смеси.

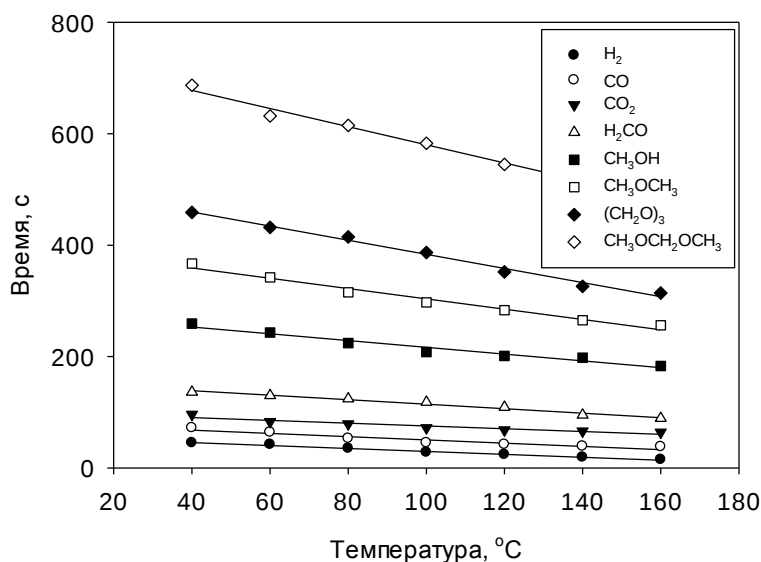


Рис. 1. Зависимость времени выхода компонентов реакционной газовой фазы от температуры колонки, линейная скорость газа 0,21 см/мин

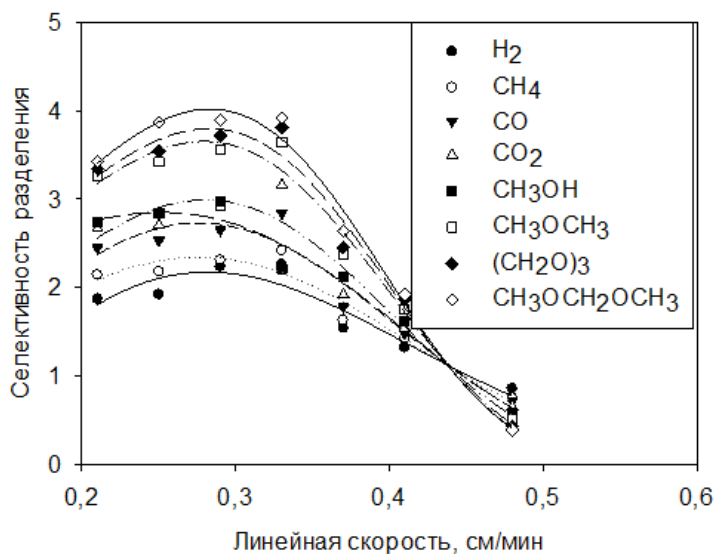


Рис. 2. Зависимость селективности разделения соответствующих пиков от линейной скорости движения газа носителя в колонке хроматографа ($t_{\text{колонки}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, газ-носитель – гелий)

Разработанный метод с градиентом температур термостатирования хроматографической колонки включал в себя следующие стадии: выдержка при 40 °C в течение 5 мин для выхода наиболее легких компонентов (водорода, метана, монооксида углерода и диоксида углерода), последующий нагрев до 160 °C при скорости нагрева 20 °C/мин и выдержка 1 мин после достижения вышеуказанной температуры. При этом общее время

анализа составило 12 мин, что приемлемо для проведения 10 анализов в течение 3 ч. Селективность разделения веществ (таблица) была существенно выше 1,94, что является приемлемым значением, показывающим достаточно хорошее разделение пиков.

Результаты разделения реакционной массы синтеза формальдегида
в режиме программирования температур

Вещество	Наименование	Время выхода, с	Селективность разделения
H ₂	Водород	43	2,48
CH ₄	Метан	78	3,26
CO	Моноксид углерода	92	3,84
CO ₂	Диоксид углерода	249	3,48
H ₂ C=O	Формальдегид	295	2,64
CH ₃ OH	Метанол	387	2,31
CH ₃ OCH ₃	Диметиловый эфир	424	2,12
(CH ₂ O) ₃	1,3,5-триоксан	581	2,05
CH ₃ OCH ₂ OCH ₃	Метилаль	683	1,94

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты исследования влияния температуры и линейной скорости газа-носителя на эффективность разделения реакционной газовой смеси процесса получения формальдегида с использованием диоксида углерода в качестве исходного соединения. Изучение влияния температуры на время разделения компонентов показало необходимость использования программирования температур для обеспечения приемлемой селективности разделения и времени проведения анализа. Исследование влияния линейной скорости газа носителя на процесс хроматографического разделения компонентов смеси позволило определить оптимальную область скоростей 0,28–0,38 см/мин. Проведенные исследования позволили разработать метод для анализа реакционной смеси с использованием программирования температуры колонки, обеспечивающий селективность разделения пиков не менее 1,94, при этом время проведения хроматографического анализа без учета времени охлаждения хроматографа составило 12 мин.

БЛАГОДАРНОСТИ

Проведенные исследования проведены в рамках выполнения работ Тверским техническим университетом проекта РНФ № 25-23-00333.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cordis G.A., Bagchi D., Maulik N., Das D.K. High-Performance Liquid Chromatographic Method for the Simultaneous Detection of Malonaldehyde, Acetaldehyde, Formaldehyde, Acetone and Propionaldehyde to Monitor the Oxidative Stress in Heart // *J Chromatogr A*. 1994. Vol. 661. No. 1-2, pp. 181–191.
2. Rivero R.T., Topiwala V. Quantitative Determination of Formaldehyde in Cosmetics Using a Combined Solid-Phase Microextraction-Isotope Dilution Mass Spectrometry Method // *J Chromatogr A*. 2004. Vol. 1029. № 1-2, pp. 217–222.

3. Trenholm R.A., Rosario-Ortiz F.L., Snyder S.A. Analysis of Formaldehyde Formation in Wastewater Using on-Fiber Derivatization-Solid-Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry // *J Chromatogr A*. 2008. Vol. 1210. No. 1, pp. 25–29.
4. Dalene M., Persson P., Skarping G. Determination of Formaldehyde in Air by Chemisorption on Glass Filters Impregnated with 2,4-Dinitrophenylhydrazine Using Gas Chromatography with Thermionic Specific Detection // *J Chromatogr A*. 1992. Vol. 626. No. 2, pp. 284–288.
5. Miralles P., Chisvert A., Alonso M.J., Hernandorena S., Salvador A. Determination of Free Formaldehyde in Cosmetics Containing Formaldehyde-Releasing Preservatives by Reversed-Phase Dispersive Liquid–Liquid Microextraction and Liquid Chromatography with Post-Column Derivatization // *J Chromatogr A*. 2018. Vol. 1543, pp. 34–39.
6. Michels J.J. Improved Measurement of Formaldehyde in Water-Soluble Polymers by High-Performance Liquid Chromatography Coupled with Post-Column Reaction Detection // *J Chromatogr A*. 2001. Vol. 914. No. 1-2, pp. 123–129.

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

ЛАГУСЕВА Елена Ивановна – 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: lagusseva@yandex.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

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., Лагусева Е.И., Старовойтов А.В., Чалов К.В., Долуда В.Ю. Аналитические особенности определения состава газовой фазы реакционной массы процесса синтеза формальдегида и его производных каталитической трансформацией диоксида углерода // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 4 (28). С. 78–84.

**ANALYTICAL FEATURES OF DETERMINING THE COMPOSITION
OF THE GAS PHASE OF THE REACTION MASS IN THE PROCESS
OF SYNTHESIS OF FORMALDEHYDE AND ITS DERIVATIVES
BY CATALYTIC TRANSFORMATION OF CARBON DIOXIDE**

A.A. Kuragin, A.I. Pichugina, E.I. Laguseva, A.V. Starovoytov, K.V. Chalov, V.Yu. Doluda
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article presents the results of developing a chromatographic method for analytical monitoring of reaction products for obtaining formaldehyde by transforming carbon dioxide. The research was carried out using a Crystallux-4000M gas chromatograph with a 5 m long, 2 mm internal diameter, packed column filled with MN-270 sorbent with a fraction of 70–120 μm . It was shown that the composition of the gas phase of the reaction medium includes hydrogen, methane, carbon monoxide and dioxide, formaldehyde, methanol, dimethyl ether, methylal, and trioxane. The influence of temperature and the linear velocity of the carrier gas on the efficiency of the analysis and the yield time of the components was determined. An increase in the column temperature leads to a decrease in the analysis time from 15 to 10 minutes, as well as to a decrease in the selectivity of the separation of chromatographic peaks. The linear velocity of the carrier gas also has a significant effect on the efficiency of separation of the components of the analyzed mixture, with the maximum separation factors of the chromatographic peaks being achieved at 0,25–0,28 cm/min. Based on the results of the studies, it can be concluded that it is necessary to use a temperature programming mode to ensure high selectivity in the separation of individual substances.

Keywords: formaldehyde, chromatography, analysis, analysis conditions, temperature, linear velocity, separation selectivity.

AKNOWLEDGEMENTS

The research was carried out as part of the work made by Tver Technical University in project of Russian Scientific foundation No. 25-23-00333.

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

LAGUSEVA Elena Ivanovna – 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: lagusseva@yandex.ru

STAROVOITOV 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

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Kuragin A.A., Pichugina A.I., Laguseva E.I., Starovoytov A.V., Chalov K.V., Doluda V.Yu. Analytical features of determining the composition of the gas phase of the reaction mass in the process of synthesis of formaldehyde and its derivatives by catalytic transformation of carbon dioxide // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 78–84.

УДК 547.29, 542.957.2

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕАКЦИИ НА КАТАЛИТИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ ГЛЮКОЗЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ Pt/Al₂O₃

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

© Петрова А.И., Цветков Д.Ю., Лакина Н.В.,
Долуда В.Ю., Сульман М.Г., 2025

Аннотация. Гетерогенный катализ лежит в основе большинства крупных промышленных химических процессов. Актуальность окисления глюкозы каталитическим методом обусловлена несколькими ключевыми факторами, которые касаются производства ценных химических веществ, использования возобновляемого сырья и экологической устойчивости. Гетерогенное каталитическое окисление глюкозы обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными ферментативными методами, хотя ферментативные методы также имеют свои достоинства. Гетерогенные катализаторы обычно более стабильны, чем ферменты. Они менее чувствительны к изменениям температуры, pH и присутствию ингибиторов. Гетерогенные катализаторы можно легко отделить от реакционной смеси и регенерировать для повторного использования. Это снижает затраты на процесс и уменьшает количество отходов. Цель данной работы – исследовать особенности каталитического окисления глюкозы, проанализировать механизмы реакций и оценить влияние различных факторов на эффективность процесса. В данной работе приводилось варьирование условий окисления глюкозы с использованием катализатора 3%Pt/Al₂O₃. Были получены оптимальные значения селективности и конверсии D-глюкозы: 77,63 и 72,71 % соответственно.

Ключевые слова: гетерогенный катализ, катализаторы, окисление, D-глюкоза.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-84-90

ВВЕДЕНИЕ

Существуют различные методы окисления глюкозы до глюконовой кислоты, включая ферментативное, каталитическое, электрохимическое и химическое окисление. На процесс каталитического окисления влияют различные факторы, такие как тип катализатора, температура, pH, давление кислорода, нагрузка на катализатор, скорость перемешивания и время реакции.

Глюконовая кислота и глюконаты находят применение в пищевой промышленности, фармацевтике, косметике, строительстве и т.д. В процессе окисления глюкозы до глюконовой кислоты проводятся исследования и разработки новых эффективных катализаторов, оптимизация условий реакции, изучение механизма реакции и использование возобновляемого сырья для производства глюкозы [1–3].

Каталитическое окисление глюкозы, несмотря на свою перспективность, сталкивается с рядом проблем, которые необходимо решить для эффективного промышленного использования разрабатываемых технологий. Достижение высокой селективности в отношении желаемого продукта является одной из главных задач. Каталитическое окисление глюкозы сопровождается образованием целого ряда продуктов: глюконовой кислоты, фруктозы, диоксида углерода и т.д. Разработка катализаторов и условий, которые обеспечивают преимущественное образование целевого продукта, представляет собой сложную задачу. Катализаторы могут дезактивироваться в процессе окисления глюкозы из-за различных причин, таких как отравление каталитических центров, образование углеродистых отложений (коксование), вымывание активного компонента, изменение структуры катализатора и т.д. Поиск способов предотвращения дезактивации и увеличения срока службы катализатора является сложной научно-технической задачей. В процессе окисления могут происходить параллельные реакции, такие как окисление продуктов реакции до нежелательных соединений (например, до CO_2) [4]. Это снижает селективность и выход целевого продукта. Необходимо разрабатывать катализаторы и условия, которые подавляют конкурентные реакции. Некоторые катализаторы, обладающие высокой активностью и селективностью (например, содержащие благородные металлы), могут быть дорогими. Поиск более дешевых и доступных каталитических материалов является актуальным в настоящее время [5].

Полное понимание механизма каталитического окисления глюкозы на молекулярном уровне необходимо для разработки более эффективных катализаторов и оптимизации условий каталитического окисления. Однако механизм этой сложной реакции до сих пор не полностью изучен. Разработка каталитических процессов окисления глюкозы, которые экономически конкурентоспособны по сравнению с традиционными методами (например, ферментативными процессами или химическими методами с использованием сильных окислителей), является важным условием для их промышленного внедрения [6].

Каталитические методы окисления глюкозы могут быть более экологичными, чем традиционные химические методы, поскольку они способны функционировать при более мягких условиях (низкие температуры и давления), использовать менее токсичные реагенты и производить меньше отходов. Например, использование кислорода в качестве окислителя и водных растворов в качестве среды реакции более экологически безопасно, чем использование сильных окислителей и органических растворителей [7].

Окисление глюкозы до глюконовой кислоты – важный процесс, который широко применяется в промышленности.

На рис. 1 представлена схема каталитического окисления глюкозы.

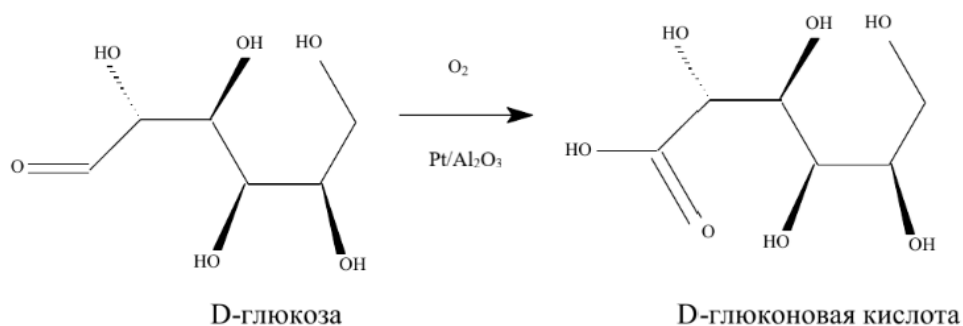


Рис. 1. Схема каталитического окисления глюкозы

В данной работе приводятся результаты подбора оптимальных условий каталитического окисления глюкозы. Процесс выполнялся в водной среде в присутствии катализатора 3 %Pt/Al₂O₃.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методика окисления глюкозы каталитическим методом

В данной работе изучался процесс каталитического окисления глюкозы до глюконовой кислоты в присутствии платинового катализатора, нанесенного на оксидный носитель Al₂O₃.

Реактор термостатируют до 60–80 °С. Затем через штуцер загружают 0,7 г глюкозы и 0,1–0,15 г катализатора, 18,5 мл воды. Затем отдельно растворяют эквимольное количество подщелачивающего агента NaHCO₃ в 6,5 мл воды, через штуцер приливают 1,5 мл этого раствора. В дальнейшем через каждые 30 мин в течение 2,5 ч приливают 1 мл NaHCO₃. После добавления всего количества NaHCO₃ реакцию ведут еще 30 мин. Общее время реакции составляет 3 ч. Температуру реакционной смеси поддерживают подачей в рубашку реактора из термостата. Перемешивание реакционной массы осуществляют подключением магнитной мешалки с количеством оборотов 1 000 об/мин. Затем подают кислород через штуцер из газового баллона, с помощью ротаметра устанавливают скорость прохождения газа 450 мл/мин.

В ходе анализа была использована хроматографическая система «Хроматэк-Кристалл ВЭЖХ 2014», снабженная рефрактометрическим детектором. Система оснащена вакуумным дегазатором, термостатом колонок и изократическим насосом с автоматической промывкой рабочих плунжеров, а также оборудованием для очистки растворителя, игольным портом и аналитической колонкой. В качестве неподвижной фазы был использован полимерный носитель Reprogel-H.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данном исследовании был проведен подбор оптимальных условий каталитического окисления глюкозы посредством варьирования температуры. Для оценки эффективности примененных условий использовались следующие параметры:

конверсия субстрата после 180 мин эксперимента;

селективность к образованию целевых продуктов после 180 мин эксперимента.

Результаты исследования влияния температуры на процесс каталитического окисления глюкозы представлены на рис. 2.

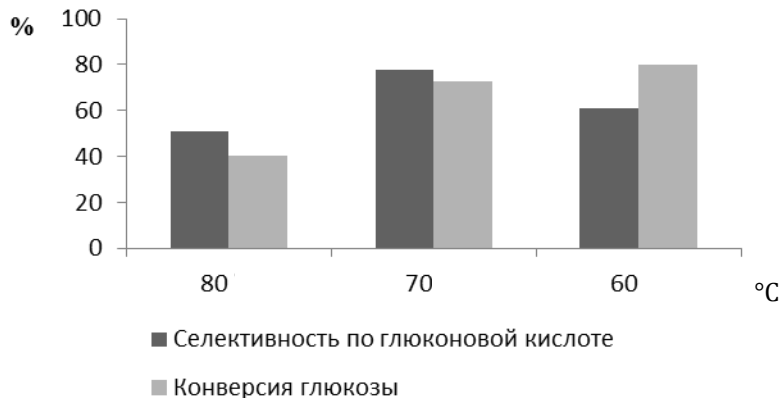


Рис. 2. Сравнительная диаграмма селективности и конверсии при разных температурных условиях

Из рисунка видно, что наименьшая селективность и конверсия наблюдаются при температуре 80 °C, и составляют 51,04 и 40,56 % соответственно. Это связано с карамелизацией глюкозы. Карамелизация – это сложный процесс термического разложения сахаров, который происходит при высоких температурах. Карамелизация приводит к распаду глюкозы, тем самым снижая ее концентрацию в реакционной смеси. Это напрямую уменьшает количество глюкозы, доступной для каталитического окисления, и, следовательно, снижает конверсию. Карамелизация приводит к образованию множества побочных продуктов, таких как альдегиды, кетоны, органические кислоты и полимерные соединения.

Реакция при 60 °C также не показала высоких результатов селективности, но конверсия составила 80,08 %. Это может быть связано тем, что адсорбция и активация молекул кислорода на поверхности катализатора недостаточно эффективны. Это приводит к неполному или неселективному окислению глюкозы, когда вместо образования целевого продукта происходит образование смеси продуктов. При низкой температуре и высокой конверсии время контакта глюкозы с катализатором увеличивается. Это может приводить к последовательному окислению целевого продукта до побочных продуктов. Например, образовавшаяся глюконовая кислота далее окисляется до более простых органических кислот или CO_2 .

Оптимальное протекание реакции наблюдается при 70 °C, так как и селективность и конверсия достаточно высоки, 77,63 и 72,71 % соответственно. При 70 °C достигается оптимальная энергия активации для образования целевого продукта. При более низких температурах энергия может быть недостаточной для эффективного протекания процесса каталитического окисления, а при более высоких температурах могут активироваться нежелательные побочные реакции. Десорбция глюкозы и кислорода на поверхности катализатора является важным этапом каталитического процесса. При температуре 70 °C может достигаться оптимальный баланс между адсорбцией реагентов и десорбцией продуктов. Слишком низкая температура может препятствовать адсорбции, а слишком высокая – приводить к десорбции реагентов до того, как они успеют прореагировать.

Растворимость кислорода в воде уменьшается с повышением температуры. При слишком высоких температурах (80 °C и выше) концентрация кислорода в реакционной

смеси может стать лимитирующим фактором, что замедлит скорость реакции. При температуре 70 °С может быть достигнут оптимальный баланс между растворимостью кислорода и скоростью реакции.

Снижение конверсии глюкозы при 70 °С связано с ингибированием процесса образования глюконат-иона и активацией параллельного пути протекания реакции – изомерного превращения глюкозы во фруктозу.

Также в ходе исследования сравнивались значения pH реакционной массы.

В таблице приведено сравнение pH реакционной массы в начале, середине и конце реакции.

Сравнение значения pH в процессе реакции

Температура, °С	pH начало	pH 50 %	pH конец	Конверсия	Селективность
60	5,80	7,30	9,13	61,05	80,08
70	5,32	6,31	7,94	77,63	72,71
80	5,90	7,20	8,50	51,04	40,56

Из таблицы видно, что значение pH достигает максимального значения при 60 и 80 °С. Эту особенность протекания реакции можно объяснить уменьшением селективности окисления D-глюкозы. Уменьшение селективности каталитического процесса при увеличении pH обусловлено сложным взаимодействием различных факторов, включая изменение механизма реакции, состояния катализатора и стабильности продуктов. Высокий pH может способствовать активации неселективных путей окисления, приводить к деградации катализатора или разложению целевого продукта. Понимание этих механизмов позволяет оптимизировать условия реакции и повысить селективность каталитического окисления глюкозы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований подбора оптимальных условий проведения каталитического окисления D-глюкозы можно сделать следующие выводы:

1. Оптимальные значения селективности и конверсии при проведении каталитического окисления D-глюкозы наблюдаются при 70 °С (77,63 и 72,71 %).
2. Проведение реакции при 60 и 80 °С ведет за собой образование побочных продуктов окисления.
3. Оптимальное значение pH находится в интервале 7–8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Isbell H.S., Pigman W. Okisleniye al'fa- i beta-glyukozy i izucheniye izomernykh form sakkhara v rastvore // *Byuro standartov, zhurnal issledovaniy*. 1933. Vol. 10. No. 3, pp. 337–356.
2. Yin Y., Ma C., Li W., Luo S., Liu Y., Wu X., Wu Z., Liu S. Rapid Conversion of Glucose to 5-Hydroxymethylfurfural Using a MoCl₃ Catalyst in an Ionic Liquid with Microwave // *Irradiation. Ind. Crops Prod.* 2021. Vol. 160. Article 113091, pp. 1–8.
3. Sandu M.P., Sidelnikov V.S., Geraskin A.A., Chernyavskii A.V., Kurzina I.A. Influence of the Method of Preparation of the Pd-Bi/Al₂O₃ Catalyst on Catalytic Properties in the Reaction of Liquid-Phase Oxidation of Glucose into Gluconic Acid // *Catalysts*. 2020. Vol. 10. No. 3, pp. 1–22.

4. Haynes T., Dubois V., Hermans S. Particle Size Effect in Glucose Oxidation with Pd/CB Catalysts // *Appl. Catal. A Gen.* 2017. Vol. 542, pp. 47–54.
5. Diverchy C., Dubois V., Devillers M., Hermans S. Bimetallic Pd-Bi/C Catalysts Prepared by Grafting of Complexes with O-Donor Ligands // *Top. Catal.* 2020. Vol. 63. No. 15-18, pp. 1485–1496.
6. Yin J., Zhang Q., Yang C., Zhang B., Deng K. Highly Selective Oxidation of Glucose to Gluconic Acid and Glucaric Acid in Water Catalyzed by an Efficient Synergistic Photocatalytic System // *Catal. Sci. Technol.* 2020. Vol. 10. No. 7, pp. 2231–2241.
7. Neves L.C.M.D. Continuous Production of Gluconic Acid and Fructose Using Membrane Bioreactor / L.C.M.D. Neves, M. Vitolo // *World J. Pharm. Pharm. Sci.* 2020. Vol. 9. No. 10, pp. 423–440.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЕТРОВА Арина Игоревна – студент, 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

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: sulmanmikhail@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Петрова А.И., Цветков Д.Ю., Лакина Н.В., Долуда В.Ю., Сульман М.Г. Изучение влияния параметров реакции на каталитическое окисление глюкозы с использованием Pt/Al₂O₃ // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 4 (28). С. 84–90.

STUDYING THE EFFECT OF REACTION PARAMETERS ON CATALYTIC OXIDATION OF GLUCOSE USING Pt/Al₂O₃

A.I. Petrova, D.Y. Tsvetkov, N.V. Lakina, V.Yu. Doluda, M.G. Sulman
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Heterogeneous catalysis is the basis of most large-scale industrial chemical processes. The relevance of glucose oxidation by catalytic methods is driven by several key

factors that relate to the production of valuable chemicals, the use of renewable raw materials, and environmental sustainability. Heterogeneous catalytic oxidation of glucose offers several advantages over traditional enzymatic methods, although enzymatic methods also have their own merits. Heterogeneous catalysts are generally more stable than enzymes. They are less sensitive to changes in temperature, pH, and the presence of inhibitors. Heterogeneous catalysts can be easily separated from the reaction mixture and regenerated for reuse. This reduces the cost of the process and the amount of waste generated. The purpose of this work is to investigate the features of the catalytic oxidation of glucose, analyze the reaction mechanisms, and evaluate the impact of various factors on the efficiency of the process. This paper presents the results of varying the conditions of glucose oxidation using a 3%Pt/Al₂O₃ catalyst to achieve optimal selectivity and conversion, 77,63 and 72,71 %, respectively.

Keywords: heterogeneous catalysis, catalysts, oxidation, glucose.

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

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: sulmanmikhail@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Petrova A.I., Tsvetkov D.Y., Lakina N.V., Doluda V. Yu, Sulman M.G. Studying the effect of reaction parameters on catalytic oxidation of glucose using Pt/Al₂O₃ // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 84–90.

УДК 543.421/424

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОИНИЦИИРОВАННОЙ СОПОЛИМЕРИЗАЦИИ МЕТИЛМЕТАКРИЛАТНЫХ И АКРИЛОНИТРИЛЬНЫХ СМОЛ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.И. Пичугина, А.С. Созонтова, Н.Ю. Старовойтова, А.В. Устимов, В.Ю. Долуда
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Пичугина А.И., Созонтова А.С., Старовойтова Н.Ю.,
Устимов А.В., Долуда В.Ю., 2025

Аннотация. Проведены исследования процессов фотоинициированной сополимеризации смол на основе метилметакрилата и акрилонитрила для 3D-печати по LCD-технологии. Получены главные физико-химические характеристики модельных образцов изучаемых композиций. Методом ИК-Фурье спектроскопии получены и проанализированы данные основных стадий процесса отверждения и постотверждения фотополимеров. Найден оптимальные параметры печати в ультрафиолетовом диапазоне для предотвращения разрушения полимера и сохранения его конструкционных свойств.

Ключевые слова: фотополимерная смола, степень отверждения, метилметакрилат, акрилонитрил, ИК-Фурье спектроскопия.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-91-97

ВВЕДЕНИЕ

В современной полимерной промышленности все большую популярность набирают аддитивные способы изготовления конструкционно сложных деталей. Метод 3D-печати по LCD-технологии является наиболее быстрым и не требующим больших затрат на изготовление продукта, а также позволяет оперативно менять и совмещать критически важные заданные свойства материала в одном монолитном изделии.

Исследование всех стадий процессов отверждения, а также изучение физико-химических свойств фотополимерных смол важно для создания новых материалов со специальными свойствами. Готовые изделия, полученные современными аддитивными технологиями, имеют широкий спектр применения в военной, инженерной и медицинской промышленности, а также включают ряд персонализированных потребительских товаров.

МЕТОДЫ, МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ

В работе представлены результаты исследования фотополимерных смол на основе метилметакрилата и акрилонитрила с вязкостью 238 МПа·с и плотностью 1,18 г/см³, так как эти композиции обладают уникальными свойствами (отличная светопропускаемость, пластичность, ударная прочность, легкость) и имеют широкой спектр применения.

Образцы для исследования получали методом 3D-печати по технологии LCD при длине волны 365–405 нм. Благодаря использованию матрицы монохромного ЖК-экрана и технологии UV-отверждения, принтер позволяет получать высококачественные детали с высокой точностью и детализацией. Процесс включает в себя следующие этапы: построение трехмерной модели; подготовку к печати путем разделения модели на сектора –

«слайсы»; налив фотополимерной смолы, в которую помещается платформа, и облучение материала под воздействием ультрафиолетовых светодиодов матрицы, что позволяет сформировать изображение. Далее образцы подвергались промывке от липкого слоя, сушке и постотверждению.

Технические характеристики фотополимера рассматривались по таким параметрам, как: усадка, состав смолы, цвет, прочность при растяжении, прочность на разрыв, твердость и вязкость.

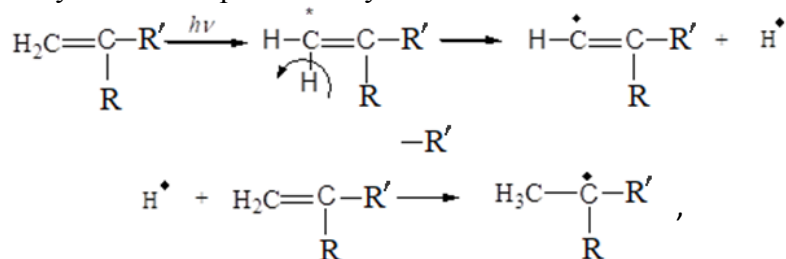
Для исследования образцов на процессы сополимеризации, отверждения и постотверждения был выбран метод ИК-Фурье спектроскопии с использованием приставки многократного нарушенного полного внутреннего отражения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В состав фотоотверждаемых композиций входят мономеры метилметакрилата и акрилонитрила; активные разбавители, обеспечивающие реологические свойства неотвержденной смолы и физико-механические свойства отвержденной композиции; фотоинициаторы, позволяющие отверждать композицию с заданной скоростью и глубиной конверсии, а также специальные добавки, продлевающие срок хранения композиций.

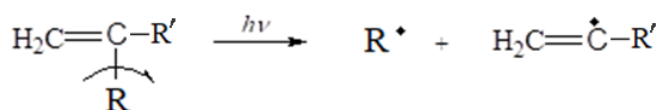
Фотоиницирование – процесс образования свободных радикалов из мономерных молекул под действием света.

Существуют 2 вида фотоиницирования: с добавлением сенсibilизаторов и без. Сенсibilизаторы, или фотоинициаторы – специальные вещества, легко распадающиеся на свободные радикалы. Без добавления сенсibilизаторов фотоиницирование возможно для мономеров, имеющих основную полосу поглощения в ультрафиолетовой области. Примеры: стирол и его производные, метилметакрилат. При фотоиницированной полимеризации первичные радикалы образуются в результате переноса атома водорода от возбужденной молекулы мономера к молекуле в основном состоянии:

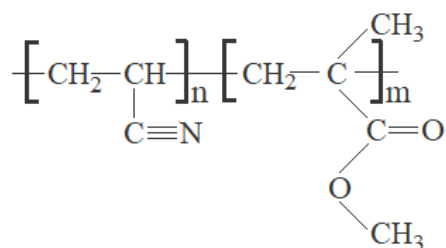


где R – (–C≡N) для акрилонитрила и (–COOCH₃) для метилметакрилата; R' – (–H) для акрилонитрила и (–CH₃) для метилметакрилата.

Возможен также распад молекулы мономера на следующие радикалы:



При совместной полимеризации метилметакрилата и акрилонитрила под действием фотоинициатора образуется сополимер следующего состава:



Реакции фотоиницирования характеризуются очень низкими энергиями активации, поэтому скорость фотоиницирования практически не зависит от температуры. Скорость фотополимеризации пропорциональна корню квадратному из интенсивности облучения.

ИК-спектр фотополимерной смолы на основе метилметакрилата представлен на рис. 1.

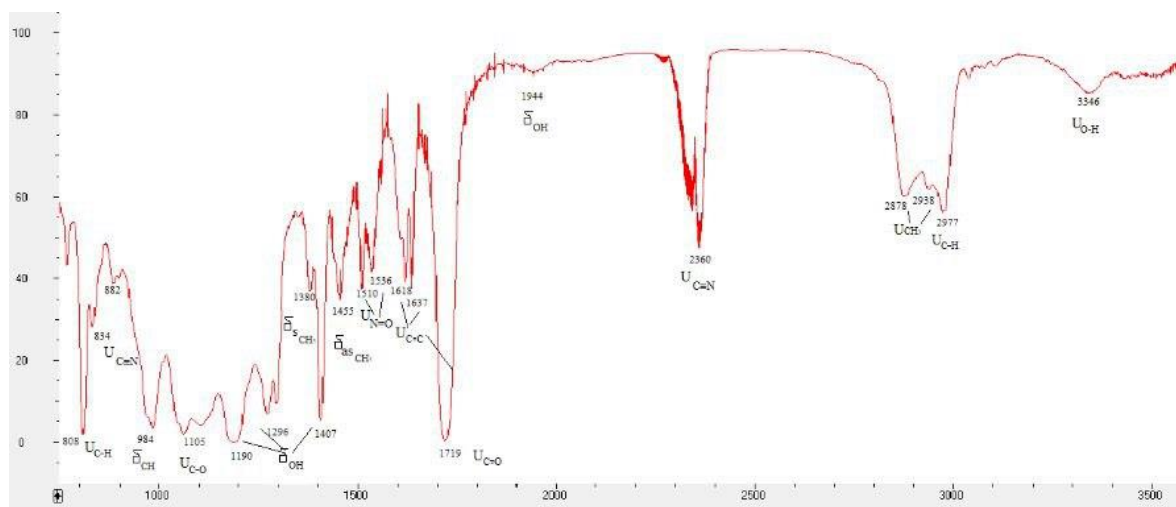


Рис.1. ИК-спектр фотополимерной смолы на основе метилметакрилата

Основной полосой поглощения является область при 1719 см^{-1} , соответствующая валентному колебанию карбонильной группы. Поглощение при 1190 , 1296 , 1407 , 1637 см^{-1} связано с валентными колебаниями связей углерод–кислород и углерод–углерод. Полосы поглощения при 3000 см^{-1} обусловлены валентными колебаниями связей углерод–водород в метильных и метиленовых группах. Поглощение при 2360 см^{-1} связано с присутствием нитрильной группы фотоинициатора.

На рис. 2 представлен ИК-спектр образца после завершения процесса 3D-печати при длине волны $365\text{--}405 \text{ нм}$.

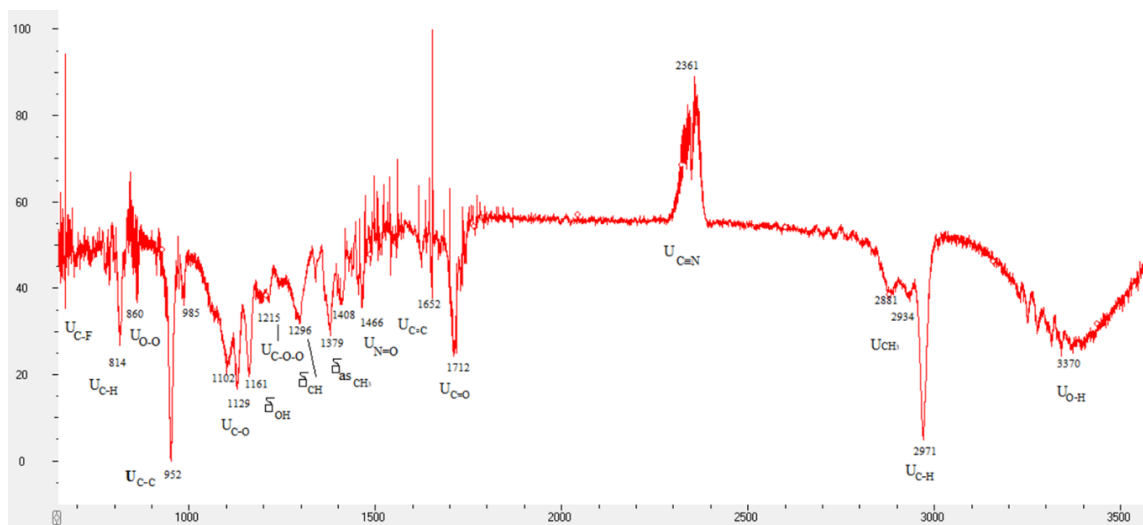


Рис. 2. ИК-спектр фотополимера после печати

Фотоиницированная полимеризация продолжается некоторое время и после удаления источника света (так называемый темновой период, или постэффект). Это объясняется малой подвижностью макрорадикалов в вязкой среде, приводящей к уменьшению скорости реакции обрыва и увеличению продолжительности существования радикалов.

На рис. 3 представлен ИК-спектр образца после стабилизации полимера и завершения процессов постотверждения.

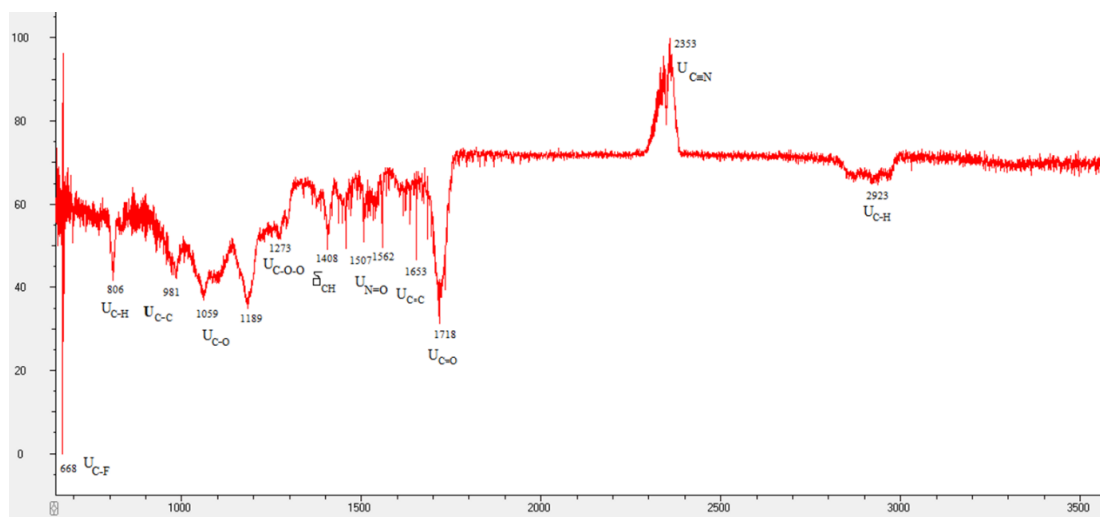


Рис. 3. ИК-спектр фотополимера после стабилизации

Сравнение ИК-спектров (см. рис. 2 и 3) показал сильное изменение интенсивности в областях поглощения полимера при $2361\text{--}2351\text{ см}^{-1}$, соответствующих нитрильной группе фотоинициатора, который имеет важную роль как в процессе фотополимеризации, так и в процессе постотверждения. При $2971\text{ и }3370\text{ см}^{-1}$ видно увеличение образования (C-H) и (O-H) связей (см. рис. 2) и отсутствие этих полос поглощения на рис. 3, что

соответствует полному завершению процессов фотополимеризации и началу процесса стабилизации полимера. Деструктивные процессы наблюдались в области значительного уменьшения интенсивности поглощения образцов при $952\text{--}980\text{ см}^{-1}$, соответствующей валентным колебаниям (C-C), за счет случайных разрывов четвертичных углеродных связей.

Для исследования процессов постотверждения полимера каждый образец, содержащий разное соотношение мономера метилметакрилата (ММА) и акрилонитрила (А) помещался в гибридную УФ-лампу в соответствии с заданным интервалом времени, после чего определялся показатель твердости по Шору.

На графике зависимости твердости образцов от времени отверждения (рис. 4) видно, что максимальная твердость с минимальным временем постотверждения фотополимера достигается при соотношении ММА/А, равном 1/0,6 по массе мономера. Характер кривых показывает, что после продолжительного и интенсивного взаимодействия УФ мощностью $48\text{--}55\text{ W}$ сразу после печати образцов, во всех исследуемых случаях, помимо процессов постотверждения, наблюдаются процессы деструкции полимера, приводящие к снижению эксплуатационных характеристик. По физико-химическим данным фотополимерных моделей при облучении УФ более 20 мин параметры твердости снижаются на 4 ед. по Шору, температура деформации полимера падает на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и прочность на изгиб уменьшается на $10\text{--}15\text{ МПа}$.

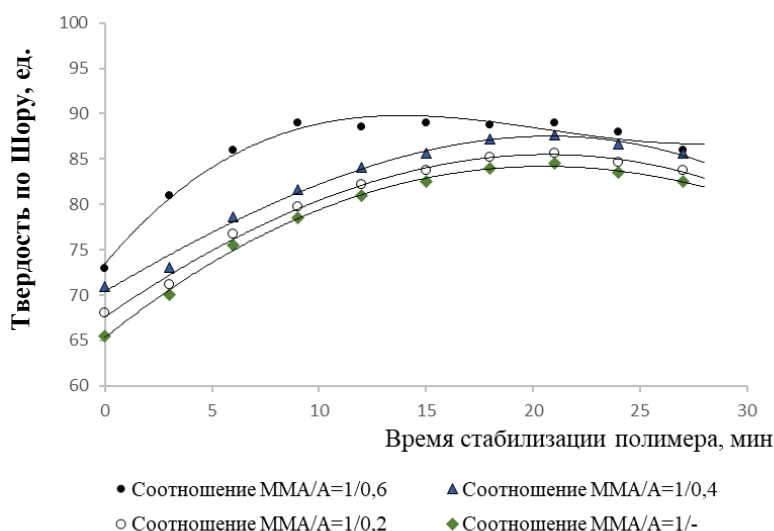


Рис. 4. Зависимость твердости образцов от времени постотверждения (стабилизации) полимеров

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены закономерности основных стадий процессов фотоинициированной сополимеризации метилметакрилатных и акриланитрильных смол для 3D-печати по LCD-технологии. Для предотвращения деструкции фотополимеров и сохранения эксплуатационных характеристик изделий получено оптимальное время постотверждения при интенсивности УФ $48\text{--}55\text{ W}$, которое составляет $15\text{--}20\text{ мин}$. При соотношении ММА/А, равном 1/0,6 по массе мономера, получена максимальная твердость по Шору с минимальным временем постотверждения полимера, что позволяет расширить область

применения модифицированных метилметакрилатных смол инженерного назначения для аддитивных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
2. Пичугина А.И., Чурсанов Ю.В. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (ИКФС, FTIR): учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2025. 84 с.
3. Старовойтова Н.Ю., Пичугина А.И., Панкратов Е.А. Химия и физика полимеров: учебное пособие: в 4 ч. Изд. 2-е, доп. Тверь: ТвГТУ, 2025. Ч. 1. Химия полимеров. 92 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

СОЗОНТОВА Ангелина Сергеевна – магистрант, 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

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

Пичугина А.И., Созонтова А.С., Старовойтова Н.Ю., Устимов А.В., Долуда В.Ю. Исследование фотоинициированной сополимеризации метилметакрилатных и акрилонитрильных смол для аддитивных технологий // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 3 (27). С. 91–97.

RESEARCH OF PHOTOINITIATED COPOLYMERIZATION OF METHYL METHACRYLATE AND ACRYLONITRILE RESINS FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES

A.I. Pichugina, A.S. Sozontova, N.Yu. Starovoytova,, A.V. Ustimov, V.Yu. Doluda
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Research of the processes of photo-initiated copolymerization of resins based on methyl methacrylate and acrylonitrile for 3D printing by LCD technology. Obtained the basic physical and chemical characteristics of model samples based on the studied compositions. Using

the IR-Fourier spectroscopy method, obtained and analyzed data of the main stages of the curing and post-curing process of photopolymers. Found the optimal parameters of printing in UV to prevent the destruction of the polymer and preserve its structural properties.

Keywords: photopolymer resin, degree of curing, methyl methacrylate, acrylonitrile, IR-Fourier spectroscopy.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

SOZONTOVA Angelina Sergeevna – graduate student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: xt-337@mail.ru

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

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 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

Pichugina A.I., Sozontova A.S., Starovoytova N.Yu., Ustimov A.V., Doluda V.Y. Research of photoinitiated copolymerization of methyl methacrylate and acrylonitrile resins for additive technologies // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 91–97.

УДК 547.29, 542.957.2

ОСОБЕННОСТИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ L-СОРБОЗЫ НА ПЛАТИНОВЫХ КАТАЛИЗАТОРАХ

Д.Ю. Цветков, А.И. Петрова, Н.В. Лакина, В.Ю. Долуда, М.Г. Сульман

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Цветков Д.Ю., Петрова А.И., Лакина Н.В.,
Долуда В.Ю., Сульман М.Г., 2025

Аннотация. Каталитическое окисление углеводов, таких как сорбоза, представляет собой важный процесс в химической и биохимической промышленности. Сорбоза, являясь сахаром, широко используется в производстве витаминов, сладких добавок и других пищевых продуктов. Однако для эффективного использования сорбозы в различных химических процессах необходимо преобразование её структуры, что может быть

достигнуто с помощью каталитического окисления. Особенности каталитического окисления сорбозы на гетерогенных катализаторах включают выбор подходящего катализатора, условия реакции (температуру, давление, растворитель) и механизмы взаимодействия между катализатором и субстратом. Цель данной работы – исследовать особенности каталитического окисления сорбозы на различных гетерогенных катализаторах, проанализировать механизмы реакций и оценить влияние различных факторов на эффективность процесса. Рассмотрение этих аспектов позволит глубже понять потенциал использования сорбозы в химической переработке и создать новые подходы к её каталитическому преобразованию. В данной работе при окислении сорбозы при равных условиях реакции были применены два гетерогенных платиновых катализатора, известных из научной литературы. Все образцы анализировали с использованием ВЭЖХ. Селективность по отношению к 2-кето-1-гулоновой кислоте определяли на основе этих аналитических данных.

Ключевые слова: окисление L-сорбозы, каталитическое окисление, гетерогенные катализаторы.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-97-104

ВВЕДЕНИЕ

Гетерогенные катализаторы на основе платины играют ключевую роль в процессе окисления углеводов благодаря своей высокой активности и селективности. Платиновые катализаторы обладают уникальными свойствами, которые позволяют эффективно активировать молекулы кислорода и способствовать окислению углеводов при относительно низких температурах. Однако несмотря на эти преимущества, каталитическое окисление сорбозы на платиновых катализаторах сталкивается с рядом проблем, таких как низкая селективность к целевым продуктам и образование побочных веществ. Важным аспектом является также влияние условий реакции (температуры, давления и выбора растворителя) на эффективность процесса. Понимание механизмов взаимодействия между платиновыми катализаторами и сорбозой позволяет разработать новые подходы к оптимизации реакционных условий и улучшению селективности [1].

В химической промышленности гетерогенные катализаторы обычно применяются для превращения моно- и дисахаридов в альдоновые кислоты. В большинстве распространённых способов окисления в качестве исходного материала используется относительно недорогая сорбоза. Ещё одним преимуществом такого подхода является биоразлагаемость продуктов окисления. В зависимости от катализатора и условий реакции (металлического центра, pH) различные углеродные центры в сорбозе могут подвергаться селективному окислению с образованием кетонов и карбоновых кислот. Таким образом, в этом процессе крайне важно контролировать как региоселективность, так и селективность по функциональным группам. Из-за высокой растворимости сахаров в воде эти гетерогенные реакции проводятся в системе с водной фазой с использованием металлического катализатора на твёрдой подложке (например, Pt или Pd на активированном угле, оксиде кремния, оксиде алюминия, полимере) и окислителя, чаще всего молекулярного кислорода, или в непрерывных процессах [2].

Было изучено несколько параметров, влияющих на превращение сорбозы в 2-кето-1-гулоновую кислоту. К ним относятся: температура процесса, pH раствора.

Катализаторы на основе платины, нанесенные на активированный уголь, диоксид кремния, оксиды металлов, полимеры и целлюлозу показали потенциал для крупномасштабного коммерческого применения. Системы на основе платины часто более активны при низкой концентрации катализатора, но имеют повышенную склонность к выщелачиванию катализатора на последующих этапах переработки.

Гетерогенное окисление глюкозы до 2-кето-1-гулоновой кислоты часто ограничивается побочными реакциями, такими как разрыв связи C–C, что приводит к образованию смеси продуктов распада. Для синтеза 2-кето-1-гулоновой кислоты обычно используются каталитические системы Pt/C, Pt/Al₂O₃ и Pt/SiO₂. Основными ограничениями этого процесса являются низкий выход окисленных продуктов и их отделение от побочных продуктов, образующихся при расщеплении сорбозы [3–4].

Селективность реакций каталитического окисления спиртовой группы C₁ сорбозы значительно ниже, чем альдегидной группы альдо-сахаров. Присутствие в молекуле кетозы двух концевых спиртовых групп, почти одинаково доступных для окисления, приводит к снижению избирательности процесса. Окисление сорбозы в 2-кетогулоновую кислоту – коммерчески важный процесс, поскольку 2-кетогулоновая кислота является промежуточным продуктом в производстве витамина C.

Однако окисление сорбозы происходит с очень низкой селективностью, а главным побочным продуктом реакции является 5-кетоглюконовая кислота, которая образуется в результате окисления C₆ группы субстрата.

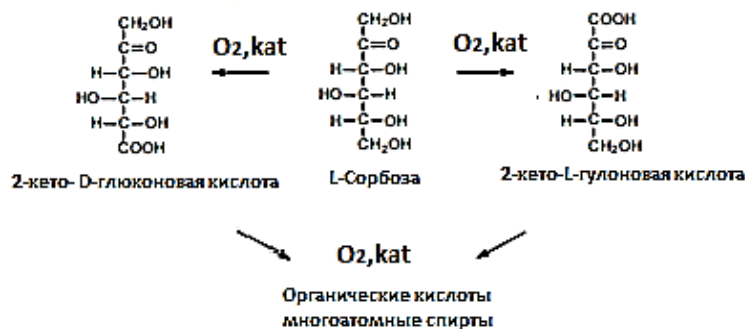


Рис. 1. Схема образования продуктов реакции окисления сорбозы

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методика окисления сорбозы на гетерогенных катализаторах

Реактор термостатируют до 60–80 °С. Затем через штуцер загружают 0,5 г сорбозы и 0,1–0,15 г катализатора, 18,5 мл воды. Затем отдельно растворяют эквимольное количество подщелачивающего агента NaHCO₃ в 6,5 мл воды, через штуцер приливают 1,5 мл этого раствора. В дальнейшем через каждые 30 мин в течение 2,5 ч приливают 1 мл NaHCO₃. После добавления всего количества NaHCO₃ реакцию ведут еще 30 мин. Общее время реакции составляет 3 ч. Температуру реакционной смеси поддерживают подачей в рубашку реактора из термостата. Устанавливают перемешивание реакционной массы подключением магнитной мешалки с количеством оборотов 1 000 об/мин. Затем подают кислород через штуцер из газового баллона, с помощью ротаметра устанавливают скорость 450 мл/мин.

Образцы реакционной смеси отфильтровали и проанализировали методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ).

Методика идентификации сахаридов методом ВЭЖХ

Содержание моносахаров в реакционной смеси определяли методом ВЭЖХ. В ходе анализа была использована хроматографическая система «Хроматэк-Кристалл ВЭЖХ 2014», снабженная рефрактометрическим детектором. Система оснащена вакуумным дегазатором, термостатом колонок и изократическим насосом с автоматической промывкой рабочих плунжеров, а также устройством очистки растворителя, игольным портом и аналитической колонкой из нержавеющей стали. В качестве неподвижной фазы был использован полимерный носитель Reprogel-H. Колонка характеризовалась наличием 15 000 теоретических тарелок, а коэффициенты асимметрии пиков не превышали 1,005. В качестве подвижной фазы использовались вода, подкисленная серной кислотой. Скорость подачи элюента составила 0,5 мл/мин, давление на входе колонки 48 атм. Хроматографический анализ проводился при температуре 30 °С. Время анализа составляло 60 мин. Определение концентрации сахаров проводилось по стандартным веществам и соответствующим калибровочным зависимостям с использованием сорбозы и других сахаров. Идентификацию пиков сахаров осуществляли по ранее установленным временам удерживания. Затем рассчитали отношение суммы площадей характеристических пиков моносахарида к площади пика внутреннего стандарта и с помощью калибровочных кривых определили концентрацию сахара в пробе.

Для получения калибровочных кривых подготовили серию калибровочных растворов сахара (1 %, 2 %, 3 %, 4 %).

Окисление сорбозы проводили с использованием различных условий: варьирования температуры, времени процесса, изменения способа подачи подщелачивающего агента (табл. 1).

Таблица 1

Условия проведения процесса каталитического окисления L-сорбозы

№ п/п	Температура, °С	Состав катализатора	pH _{нач.}	pH _{50%}	pH _{кон.}
1	60	Pt/Al ₂ O ₃	6,12	8,21	9,23
2	70	Pt/Al ₂ O ₃	5,18	7,01	6,12
3	80	Pt/Al ₂ O ₃	5,45	7,67	8,41

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При изучении литературных данных [5–7] выявили, что лучшие результаты в процессе окисления моносахаридов, в том числе L-сорбозы, показали металлы платиновой группы, нанесенные на Al₂O₃. Поэтому в ходе данной работы провели серию опытов каталитического окисления сорбозы на платиновом гетерогенном катализаторе (Pt/Al₂O₃) с 3%-ой концентрацией Pt. Для изучения закономерностей влияния температуры на процесс окисления сорбозы в 2-кето-1-гулоновую кислоту опыты проводились в интервале температур 60–80 °С. Определяющими параметрами данного процесса являются селективность и конверсия. Зависимость селективности от температуры процесса представлена в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость селективности и конверсии от температуры процесса

№ п/п	Температура, °С	Селективность, %	Конверсия, %
1	60	53,04	19,59
2	70	76,84	52,74
3	80	72,00	23,16

Из представленных данных видно, что наилучшая селективность была достигнута при 70 °С (76,84 %) и в данных условиях наблюдалась лучшая конверсия сорбозы в 2-кетол-гулоновую кислоту (52,74 %). Это свидетельствует о том, что сорбоза является термолабильным соединением, и повышение температуры выше 70 °С ведет к образованию продуктов ее переокисления и, соответственно, к снижению селективности процесса. При проведении процесса при 60 °С наблюдали низкие значения как селективности, так и конверсии.

Стоит отметить, что время проведения процесса составляет 180 мин, поэтому результаты конверсии и селективности, представленные в таблице, соответствуют времени реакции – 180 мин. При добавлении подщелачивающего агента по методике, указанной в обзоре, дальнейшее каталитическое окисление сорбозы нецелесообразно. При проведении окисления сорбозы более 180 мин значения конверсии изменяются незначительно, что говорит об оптимально подобранном времени реакции. Зависимость конверсии L-сорбозы от времени проведения процесса в указанных условиях представлена на рис. 2.

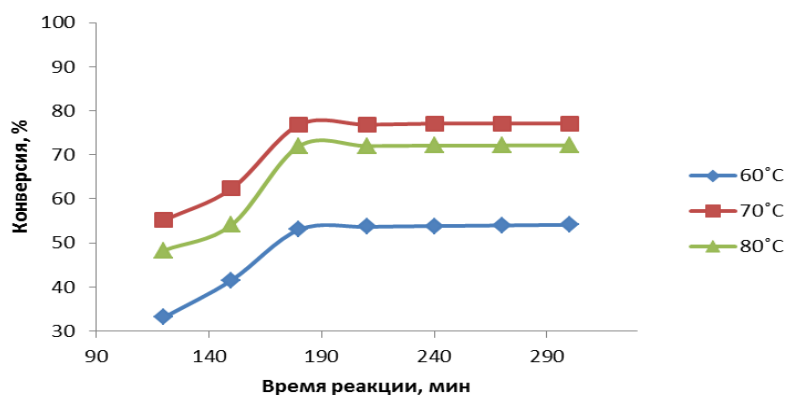


Рис. 2. Зависимость конверсии L-сорбозы от времени процесса

Согласно данным из источников [6–8], значение pH реакционной смеси оказывает существенное влияние на скорость и селективность реакции сорбозы. Для определения скорости подачи подщелачивающего агента была проведена серия экспериментов в подобранных оптимальных условиях:

- температура ведения процесса – 70 °С;
- перемешивание реакционной массы – 1 000 об/мин;
- масса сорбозы – 0,5 г;
- время эксперимента – 180 мин;
- масса катализатора – 0,1 г.

В ходе исследования рассматривали два варианта ввода подщелачивающего агента в реакционную смесь: однократное добавление эквимольного количества NaHCO_3 и периодическое добавление в течение всего времени эксперимента. Зависимость изменения pH реакционной смеси от времени и выбранного способа ввода подщелачивающего агента представлена на рис. 3.

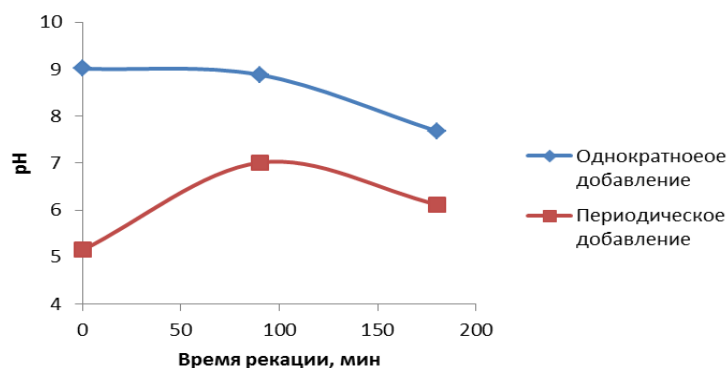


Рис. 3. Зависимость изменения pH реакционной смеси от способа ввода подщелачивающего агента

По представленным зависимостям видно, что однократное добавление NaHCO_3 приводит к повышению pH среды в течение всего процесса, что ведет к образованию побочных продуктов реакции. Периодическое добавление подщелачивающего агента оказывает положительное влияние на ход реакции окисления L-сорбозы и обеспечивает высокий выход целевого продукта.

Результаты изменения селективности процесса в зависимости от pH среды представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты изменения селективности процесса от pH среды

Вариант добавления	pH _{нач.}	pH _{50%}	pH _{кон.}	Конверсия, %	Селективность, %
Однократное	9,01	8,88	7,68	61,52	56,11
Периодическое	5,18	7,01	6,12	52,74	76,84

Было определено экспериментально, что при периодическом добавлении NaHCO_3 в реакционную смесь наблюдаются более высокие значения селективности, нежели при однократном добавлении. В свою очередь, конверсия сорбозы в 2-кето-1-гулоновую кислоту больше в первом варианте. Это говорит о том, что при значениях $\text{pH} > 7$ реакция окисления сорбозы проходит с более высоким количеством побочных продуктов реакции, что влияет на селективность процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно сделать вывод, что процесс окисления сорбозы в 2-кето-1-гулоновую кислоту зависит от многих факторов, в том числе от температуры ведения процесса и pH раствора. Подбор оптимальных условий приводит к повышению значений селективности и конверсии сорбозы. При повышенных значениях pH (более 7,5)

наблюдается образование побочных продуктов и снижение селективности. Оптимальная температура ведения процесса – 70 °С, повышение температуры ведет к образованию продуктов перекисления, понижение к падению значений селективности вследствие термолабильности сорбозы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baker L.R., Smith J.A. Catalytic Oxidation of Sugars: Mechanisms and Applications // *Journal of Catalysis*. 2018. Vol. 361, pp. 123–134.
2. Chen X., Wang Y. Platinum-based Catalysts for the Oxidation of Alcohols: A Review // *Catalysis Today*. 2020. Vol. 335, pp. 45–56.
3. Gao Y., Liu H. Heterogeneous Catalysis for Sugar Conversion: A Review of Recent Advances // *Green Chemistry*. 2019. Vol. 21 (12), pp. 3221–3238.
4. Kumar S., Singh R. Platinum Nanoparticles on Supports: Synthesis and Catalytic Applications in Organic Reactions // *Applied Catalysis A: General*. 2021. Vol. 611, 117927.
5. Li Q., Zhang L. Catalytic Properties of Platinum in the Oxidation of Sugars: Insights from Experimental and Theoretical Studies // *Chemical Reviews*. 2017. Vol. 117 (12), pp. 7690–7712.
6. Smith R., Johnson, T. Advances in Heterogeneous Catalysis for Biomass Conversion: Focus on Platinum Catalysts // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 164, pp. 123–135.
7. Wang J., Zhao Y. The Role of Support Materials in Enhancing the Activity of Platinum Catalysts for Sugar Oxidation Reactions // *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2018. Vol. 458, pp. 35–45.
8. Zhang Y., Chen Z. Mechanistic Studies on the Catalytic Oxidation of Sorbose Over Platinum Catalysts: Insights from Kinetic Modeling and Spectroscopy // *ACS Catalysis*, 2019. Vol. 9. No. 3, pp. 2110–2120.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

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

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

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: sulmanmikhail@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Цветков Д.Ю., Петрова А.И., Лакина Н.В., Долуда В.Ю., Сульман М.Г. Особенности каталитического окисления L-сорбозы на платиновых катализаторах // Вестник Тверского

государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 4 (28). С. 97–104.

FEATURES OF CATALYTIC OXIDATION OF L-SORBOSE ON PLATINUM CATALYSTS

D.Y. Tsvetkov, A.I. Petrova, N.V. Lakina, V.Yu. Doluda, M.G. Sulman
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Catalytic oxidation of carbohydrates, such as sorbose, is an important process in the chemical and biochemical industry. Sorbose, being a sugar, is widely used in the production of vitamins, sweet additives, and other food products. However, in order to effectively use sorbose in various chemical processes, its structure must be transformed, which can be achieved through catalytic oxidation. The features of catalytic oxidation of sorbose on heterogeneous catalysts include the selection of an appropriate catalyst, the reaction conditions (temperature, pressure, and solvent), and the mechanisms of interaction between the catalyst and the substrate. The aim of this work is to investigate the features of the catalytic oxidation of sorbitol on various heterogeneous catalysts, to analyze the reaction mechanisms and to evaluate the influence of various factors on the efficiency of the process. The consideration of these aspects will allow to gain a deeper understanding of the potential of sorbitol use in chemical processing and to develop new approaches to its catalytic transformation. In this work, two heterogeneous platinum catalysts known from the literature were used in the oxidation of sorbitol under equal reaction conditions. All samples were analyzed using HPLC. Selectivity with respect to 2-keto-l-gulonic acid was determined based on these analytical data.

Keywords: oxidation of sorbitol, catalytic oxidation, heterogeneous catalysts.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

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

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

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: sulmanmikhail@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Petrova A.I., Tsvetkov D.Y., Lakina N.V., Doluda V. Yu, Sulman M.G. Features of catalytic oxidation of L-sorbose on platinum catalysts // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 97–104.

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

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

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

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

Главный редактор

Гультияев В.И. – д.т.н., доцент ТвГТУ

Ответственный секретарь

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

Члены редакционной коллегии:

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

Белов В.В. – д.т.н., профессор ТвГТУ

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

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

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

Ковалев К.Л. – д.т.н., профессор МАИ

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

Корнеев К.Б. – к.т.н., доцент ТвГТУ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Трещев А.А. – д.т.н., профессор ТулГУ

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

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

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

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

ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал
№ 4 (28), 2025

Редактор Е.Г. Подгорная
Корректор С.В. Зорикова

Подписано в печать 29.12.2025

Дата выхода в свет 30.12.2025

Формат 60 x 84 1/8

Физ. печ. л. 13,25

Тираж 500 экз.

Цена свободная

Усл. печ. л. 12,32

Заказ № 51178

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 11,52

С – 106

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