

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 (24), 2024**

Тверь 2024

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2024. № 4 (24). 108 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>Крутских А.В., Корнеева Е.И.</i> Применение анализа Big Data при планировании текущих и капитальных ремонтов жилого фонда .....	5
<i>Курбатов Н.П.</i> Эксплуатация и обслуживание мелиоративных гидротехнических сооружений, не задействованных в народном хозяйстве .....	10
<i>Курятников Ю.Ю.</i> Применение композитной арматуры в бетонных кольцах колодцев водопровода и канализации .....	14
<i>Москвица Ю.Н., Крутских А.В.</i> Использование лазерных технологий в строительной отрасли .....	19
<i>Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Зверев М.С., Цыбина Р.З.</i> Роль добавки микрокремнезема в коррозионно-стойких цементных композитах .....	24
<i>Ткач Е.В., Филимонова Ю.С., Янкович Д.Р., Паевский В.И.</i> Исследование гидрофизических свойств тяжелого бетона, модифицированного комплексным модификатором и работающего в суровых условиях эксплуатации .....	31
<i>Эквист К.А., Белов В.В.</i> Использование базальтовой фибры и добавки микрокальцита в составах эффективного базальтофибробетона .....	42

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Куликова М.А., Торгованова О.Н., Корнеев К.Б.</i> Методы объяснимого искусственного интеллекта для энергетических и электроэнергетических систем: обзор, проблемы и возможности .....	50
<i>Макаров А.Н.</i> Законы теплового излучения газовых объемов электродуговых сталеплавильных печей, факельных нагревательных печей, топков паровых котлов, камер сгорания газотурбинных установок .....	58

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Белов В.В.</i> Определение реологических свойств твердообразных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов, с помощью конусной пенетрации. Часть 3. Экспериментальные исследования .....	68
<i>Горцевич С.Л., Пичугина А.И., Соболев А.Е., Меденков В.Д.</i> Исследование кинетики растворения меди фотометрическим методом с бис(циклогексанон)оксалилдигидразоном при образовании разнолигандных комплексов .....	75
<i>Пичугина А.И., Старовойтова Н.Ю., Оспенников М.В.</i> Исследование процессов отверждения непрелдельных полиэфирных смол методом многократного нарушенного полного внутреннего отражения .....	80
<i>Прокудин Е.О., Савицкий В.В., Николаевский В.Е., Небратенко Д.Ю.</i> Эффективное средство борьбы с преждевременным разрушением асфальтобетонного покрытия в зоне стыков и швов .....	86
<i>Старовойтова Н.Ю., Пичугина А.И., Ковалев А.Г., Николаев А.В.</i> Исследование зависимости содержания кислотных групп в полиэтилентерефталате от параметров процесса промышленного синтеза полимера .....	95
<i>Чалов К.В., Лагушева Е.И., Луговой Ю.В., Долуда В.Ю.</i> Метод утилизации полимерных отходов .....	100

# CONTENTS

## CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<b>Krutskikh A.V., Korneeva E.I.</b> The use of Big Data analysis in planning current and major repairs of the housing stock.....	5
<b>Kurbatov N.P.</b> Operation and service of melioration hydraulic structures not involved in the national economy .....	10
<b>Kuryatnikov Yu.Yu.</b> Application of composite reinforcement in concrete rings of water supply and sewage wells.....	14
<b>Moskvina Yu.N., Krutskikh A.V.</b> The use of laser technologies in the construction industry.....	19
<b>Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Zverev M.S., Tsybina R.Z.</b> The role of microsilica additive in corrosion resistant cementitious composites.....	24
<b>Tkach E.V., Filimonova Yu.S., Jankovich D.R., Paevsky V.I.</b> Improvement of hydrophysical properties of modified heavy-duty concrete working in severe operating conditions.....	31
<b>Ekvist K.A., Belov V.V.</b> The use of basalt fiber and microcalcite additives in the compositions of effective basalt fiber concrete.....	42

## ELECTRICAL ENGINEERING

<b>Kulikova M.A., Torgovanova O.N., Korneev K.B.</b> Explainable artificial intelligence methods for power and electricity systems: review, challenges and possibilities.....	50
<b>Makarov A.N.</b> Laws of thermal radiation of gaseous volumes of electric arc steel-melting furnaces, flare heating furnaces, steam boiler furnaces, combustion chambers of gas turbine plants.....	58

## CHEMICAL TECHNOLOGY

<b>Belov V.V.</b> Determination of rheological properties of solid dispersed systems used in the production of building materials applying cone penetration technique. Part 3. Pilot studies...	68
<b>Gortsevich S.L., Pichugina A.I., Sobolev A.E., Medenkov V.D.</b> Investigation of the kinetics of copper dissolution by the photometric method with bis(cyclohexanone)oxalyl dihydrazone in the formation of multi-ligand complexes.....	75
<b>Pichugina A.I., Starovoitova N.Yu., Ospennikov M.V.</b> Investigation of the curing processes of unsaturated polyester resins by the method of multiple disturbed total internal reflection .....	80
<b>Prokudin E.O., Savitsky V.V., Nikolaevsky V.E., Nebratenko D.Yu.</b> An effective means of combating premature destruction of asphalt concrete pavement in the areas of joints and seams.....	86
<b>Starovoitova N.Yu., Pichugina A.I., Kovalev A.G., Nicolaev A.V.</b> Investigation of the polyethylene terephthalate acid groups content in dependence of industrial synthesis parameters.....	95
<b>Chalov K.V., Laguseva E.I., Lugovoy Yu.V., Doluda V.Yu.</b> Method of polymer waste disposal.....	100

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 004.048+332.8

### ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИЗА BIG DATA ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ТЕКУЩИХ И КАПИТАЛЬНЫХ РЕМОНТОВ ЖИЛОГО ФОНДА

**А.В. Крутских, Е.И. Корнеева***Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Крутских А.В., Корнеева Е.И., 2024

**Аннотация.** В статье рассмотрено развитие технологий больших данных (Big Data) в сфере ЖКХ. Проанализированы системы управления недвижимостью (BMS) для автоматизации контроля текущего и капитального ремонта. В целях подготовки данных в BMS использованы стандартные этапы обработки данных для анализа, включающие интеграцию, очистку и трансформацию данных, а также внедрение алгоритмов машинного обучения. Освещены проблемы внедрения технологий работы с большими данными в сфере ЖКХ и сложности обработки официальных данных по многоквартирным домам.

**Ключевые слова:** Big Data, анализ данных, машинное обучение, прогнозирование, классификация, текущий ремонт, капитальный ремонт, жилой фонд.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-5-9**

Развитие технологий больших данных (Big Data) в сфере ЖКХ обусловлено огромными объемами информации о потреблении ресурсов и работе оборудования, повсеместным внедрением технологии Building Information Modeling (BIM) в строительной отрасли [1]. Для работы с Big Data применяются технологии Hadoop, Spark на платформах «Яндекса» и «Сбера», а также алгоритмы машинного обучения. Драйвером процесса цифровизации в России на глобальном уровне становится государство в целом и утвержденная в середине 2023 года программа в частности [2].

Неэффективное планирование ремонтов в жилищном фонде – серьезная проблема, которая требует решения. Эксплуатирующие организации (управляющие компании, товарищества собственников жилья и др.) с ростом жилого фонда вынуждены хранить, обрабатывать и анализировать большой объем эксплуатационных данных [3].

Будем рассматривать Big Data как серию подходов, инструментов и методов обработки огромных объемов структурированных и неструктурированных данных для получения необходимых человеку результатов. Термин предложил Клиффорд Линч в 2008 году [4]. К данным для планирования текущего и капитального ремонта относят информацию о состоянии объекта, историю ремонта, эксплуатационные показатели и прогнозы на будущее. Этапы планирования включают сбор данных, анализ текущего состояния, определение потребности в ремонтных работах, оптимизацию графиков проведения работ, оценку затрат и согласование с заинтересованными сторонами [3].

Текущий и капитальный ремонт регулируется федеральными и региональными нормативными актами, устанавливающими стандарты качества и порядок проведения работ [5, 6]. Важно учитывать техническое состояние оборудования, сроки его износа, а также влияние климатических факторов на эксплуатацию объекта.

Текущий ремонт представляет собой регулярные ремонтные работы, направленные на поддержание нормального состояния объекта и продление его службы. Он включает замену отдельных деталей, изношенного оборудования, косметический ремонт поверхностных элементов. Для автоматизации контроля текущего ремонта используется система автоматизации здания (BMS), которая охватывает следующие коммуникации: вентиляцию, кондиционирование, отопление, освещение. В BMS реализуется единая система диспетчеризации с получением данных от «умных» устройств.

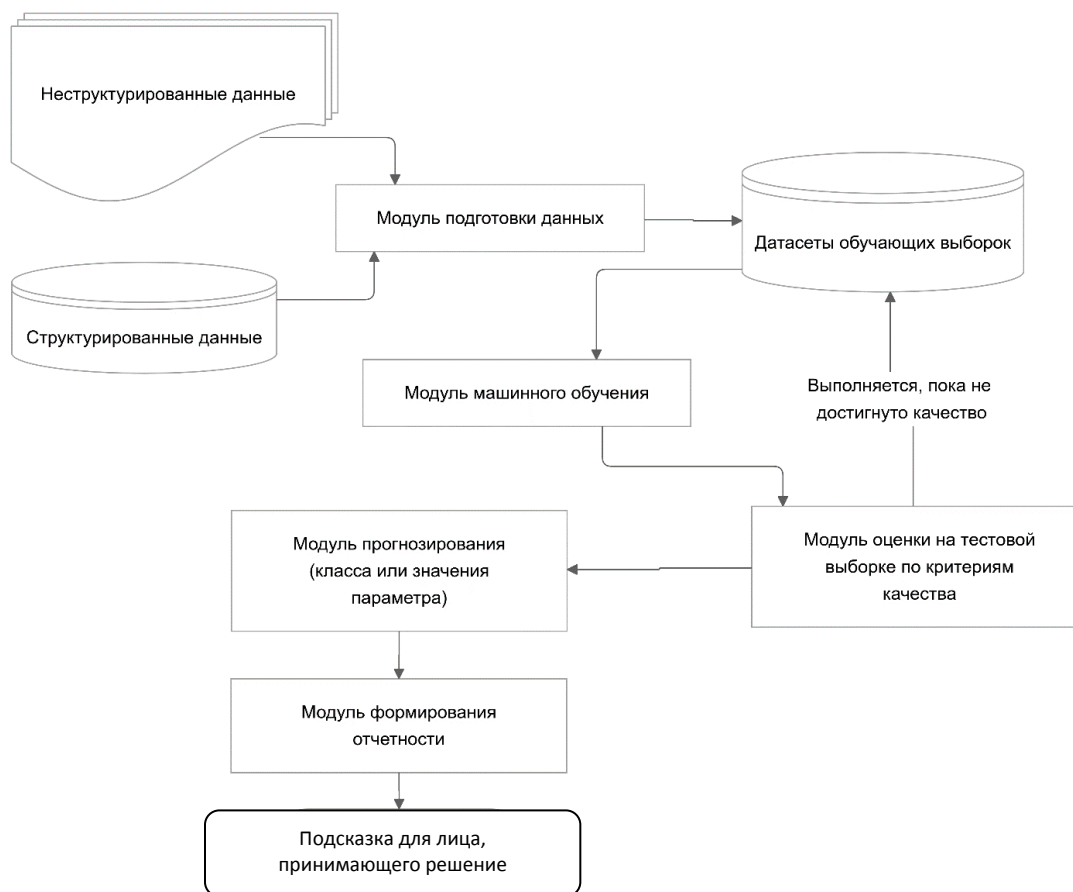
Капитальный ремонт относится к комплексным работам, требующим значительных финансовых затрат и обеспечивающим долгосрочное функционирование объекта. Он включает замену основных конструктивных элементов здания, инженерных систем и оборудования, а также реконструкцию помещений. Для капитального ремонта требуется дополнительный этап проектирования, в который входит разработка проектной документации, а также получение необходимых разрешений. При взаимодействии владельцев с обслуживающими компаниями применяют BMS.

В системе BMS используются стандартные этапы обработки данных для анализа. Сначала интегрируются данные из модулей системы: систем управления объектами, баз данных эксплуатации и датчиков и др. Затем проводится предварительная очистка и трансформация данных для удаления дублирования, исправления ошибок и приведения форматов к единому стандарту. Далее внедряются алгоритмы машинного обучения [7].

Анализ алгоритмами машинного обучения проводится для решения задач прогнозирования, классификации и кластеризации данных. Задача прогнозирования помогает выявлять потенциальные проблемы на ранней стадии, генерировать рекомендации по типу и объему необходимых ремонтных работ. Кластеризация проведенных ремонтов и их сравнение с ожидаемыми результатами дают оценить эффективность выполнения работ. Классификация и ранжирование важности поступающих жалоб позволяют постоянно совершенствовать подход к планированию ремонта. Модель предварительно оценивается критериями качества и, если критерии удовлетворяют требованиям, подготавливается для развертывания. Результат обученного алгоритма добавляется в систему, совместимость с которой настраивается специалистами. Схема работы машинного обучения с данными системы представлена на рисунке.

Некоторые алгоритмы машинного обучения позволяют решать задачи в реальном времени (например, при мониторинге состояния объектов и оповещении об изменениях [8]). В этом случае в системе происходит автоматическая настройка модели машинного обучения на новых данных. Однако полноценное решение всех задач может потребовать дополнительной обработки данных за пределами реального времени. Такая обработка проводится в ручном или полуавтоматическом формате.

Внедрение алгоритмов машинного обучения позволяет быстрее получать информацию о неисправностях и передавать данные. Скорость обмена данными и снижение влияния человеческого фактора дают возможность сократить эксплуатационные затраты жилого фонда и операционные расходы, которые в среднем составляют 75 % от общих затрат [8; 9].



Обобщенная схема работы машинного обучения  
в системе прогнозирования показателей для лица, принимающего решение

На каждом этапе планирования следует регулярно обновлять данные и корректировать план в соответствии с изменениями и новыми условиями эксплуатации объекта. При планировании должны учитываться ограничения ресурсов и сроки выполнения работ. Не менее важен анализ эффективности предыдущего ремонта для выявления оптимального подхода к текущему.

Существует ряд факторов, которые приводят к неэффективному автоматизированному планированию ремонтов в жилищном фонде на текущий момент: отсутствие централизованной координации между ведомствами и организациями, что может привести к дублированию работ и нерациональному использованию ресурсов; недостаточное количество специалистов для внедрения больших объемов данных и работы с ними; отсутствие систем отслеживания текущего состояния объектов, из-за чего усложняется своевременная передача данных для необходимого ремонта.

Исследователь, работающий над проектом машинного обучения в сфере ЖКХ, может также столкнуться с проблемами у данных, которые требуют дополнительного контроля. Среди таких проблем недостоверность данных у датчиков из-за технических сбоев или неправильной настройки, пропущенные значения и выбросы, несогласованность в формате и структуре данных между различными системами; отсутствие актуальных или частых обновлений и др.

Внедрение и использование методов Big Data для автоматизации обработки информации в сфере эксплуатации целесообразно, так как технология позволяет решить ряд вопросов: повысить качество и повлиять на своевременность выполнения ремонтов, сократить число отказов строительных конструкций и элементов инженерной инфраструктуры, уменьшить эксплуатационные затраты. Неэффективность планирования ремонтов в жилищном фонде – сложная проблема, требующая комплексного подхода. Однако для ее успешного решения необходимы согласованные действия всех заинтересованных сторон: государства, местных органов власти и общественности. Только на основе совместных усилий можно создать эффективную систему планирования ремонтов, обеспечивающую комфортное проживание граждан и сохранение качественного жилищного фонда.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ляпин А.М., Финогеев А.Г. Мотивы и результаты внедрения технологий big data в сферу жилищно-коммунального хозяйства // *Теория и практика современной науки*. 2016. № 2 (8). С. 275–278.
2. Пояснительная записка к Перспективной программе стандартизации в области умных домов, зданий и сооружений на 2023–2030 гг. // АНО «Умный МКД». 2023. URL: [https://smartmkd.ru/company/docs/ППС\\_Умный\\_МКД\\_с\\_преамбулой\\_версия\\_для\\_использования.pdf](https://smartmkd.ru/company/docs/ППС_Умный_МКД_с_преамбулой_версия_для_использования.pdf) (дата обращения: 10.10.2024).
3. Колчин В.Н. Использование технологии обработки больших данных в строительстве // *Инновации и инвестиции*. 2023. № 4. С. 285–288.
4. Big data: The Next Frontier for Innovation, Competition, and Productivity. URL: [https://www.mckinsey.com.br/~/media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/big%20data%20the%20next%20frontier%20for%20innovation/mgi\\_big\\_data\\_full\\_report.pdf](https://www.mckinsey.com.br/~/media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/big%20data%20the%20next%20frontier%20for%20innovation/mgi_big_data_full_report.pdf) (дата обращения: 10.10.2024).
5. СП 255.1325800.2016 Свод правил. Здания и сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения: утв. и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24.08.2016 № 590/пр. 2016 г. (с изм. и доп. в ред. от 02.12.2019). URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/12542/> (дата обращения: 10.10.2024).
6. СП 368.1325800.2017 Здания жилые. Правила проектирования капитального ремонта: утв. и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 25.11.2017. № 1582/пр. URL: <https://docs.cntd.ru/document/550965733> (дата обращения: 10.10.2024).
7. Ефимова А.А., Гаврилюк Е.С. Проактивное обслуживание в сфере ЖКХ как тренд технологического развития // *Экономика. Право. Инновации*. 2024. № 2. С. 15–23.
8. Сигитов А.А. Разработка методологии анализа больших данных с целью прогнозирования изменений фаз жизненного цикла элементов инженерного оборудования зданий и сооружений // *Строительство и архитектура*. 2023. № 2. С. 8–8.
9. Крутских А.В., Корнеева Е.И. Оценка внедрения наиболее актуальных цифровых технологий в строительстве и ЖКХ. *Цифровая экономика и общество: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции / под ред. А.Н. Бородулина*. Тверь: ТвГТУ, 2024. С. 20–27.



**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

*КРУТСКИХ Андрей Викторович* – старший преподаватель кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: mister.krutskih@mail.ru

*КОРНЕЕВА Елена Игоревна* – старший преподаватель кафедры программного обеспечения, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: yelena.korneeva@ya.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Крутских А.В., Корнеева Е.И. Применение анализа Big Data при планировании текущих и капитальных ремонтов жилого фонда // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 4 (24). С. 5–9.

---

**THE USE OF BIG DATA ANALYSIS IN PLANNING CURRENT  
AND MAJOR REPAIRS OF THE HOUSING STOCK**

*A.V. Krutskikh, E.I. Korneeva*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article considers the development of big data technologies (Big Data) in the sphere of housing and communal services. Real estate management systems (BMS) for automation of current and capital repair control are analyzed. In order to prepare data in BMS standard stages of data processing for analysis are used, including data integration, cleaning and transformation, as well as the introduction of machine learning algorithms. The problems of implementation of big data technologies in the sphere of housing and utilities sector and complexities of processing official data on apartment buildings are highlighted.

**Keywords:** Big Data, data analysis, machine learning, forecasting, classification, maintenance, major repairs, housing stock.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*KRUTSKIKH Andrey Viktorovich* – Senior Lecturer at the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mister.krutskih@mail.ru

*KORNEEVA Elena Igorevna* – Senior Lecturer at the Software Department, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: yelena.korneeva@ya.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Krutskikh A.V., Korneeva E.I. The use of big data analysis in planning current and major repairs of the housing stock // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 5–9.

УДК 631.6:627.8

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ  
МЕЛИОРАТИВНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ,  
НЕ ЗАДЕЙСТВОВАННЫХ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ*****Н.П. Курбатов****Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Курбатов Н.П., 2024

**Аннотация.** Статья посвящена анализу эксплуатации низконапорного гидротехнического сооружения, созданного для орошения сельскохозяйственных культур. Отмечено, что в настоящее время сооружение не эксплуатируется, перед плотиной в верхнем бьефе существует небольшой напор, но аварийная ситуация может привести к человеческим жертвам.

**Ключевые слова:** гидротехнические сооружения, мелиоративные плотины, ветро-волновая эрозия откосов плотин, ремонтно-восстановительные работы, надежность.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-10-14**

При эксплуатации мелиоративной системы ее составные элементы подвергаются воздействию различных факторов. Их влияние проявляется в виде отклонений параметров системы от расчетных значений, изменений, возникающих в период эксплуатации у креплений откосов, железобетонных водосбросных сооружений, а также в виде повышения/понижения пропускной способности.

Согласно требованиям в области охраны окружающей среды, разработка и реализация государственной политики в сфере безопасности гидротехнических сооружений должны быть направлены на сохранение благоприятной окружающей среды и здоровья человека.

В Тверской области имеются гидротехнические сооружения, которые не используются в народном хозяйстве. В основном это малые водохранилища, построенные для орошения сельскохозяйственных культур. В соответствии со статьей 225 Гражданского кодекса Российской Федерации орган местного самоуправления является единственным органом, обладающим правом подачи заявления о постановке имущества на учет в качестве бесхозяйного. Хозяйствующие субъекты в ряде случаев не признают малое водохранилище гидротехническим сооружением. При этом малые (в основном) водохранилища имеют все соответствующие признаки.

В границах сельского поселения Калининского муниципального района Тверской области находится гидротехническое сооружение на р. Ведемье. Объект состоит:

- 1) из земляной насыпи (рис. 1);
- 2) разрушенного водосброса (рис. 2);
- 3) бетонированного канала катастрофического сброса (рис. 3).

Все перечисленное свидетельствует о том, что данный водный объект имеет не естественное происхождение, а искусственное.



Рис. 1. Водоем и земляная насыпь (плотина)



Рис. 2. Разрушенное водосбросное сооружение



Рис. 3. Бетонированный канал катастрофического сброса

Перепад отметок воды в водоеме и в нижнем бьефе реки составляет около 2 м.

Осмотр показал, что водный объект был создан для орошения сельскохозяйственных культур. Согласно нормативным документам, он считается гидротехническим сооружением (см. п. 3.3 источника [1]).

Гидротехнические сооружения – сооружения, подвергающиеся воздействию водной среды, предназначенные для использования и охраны водных ресурсов, предотвращения вредного воздействия вод, в том числе загрязненных жидкими отходами, включая:

плотины, здания гидроэлектростанций, гидроаккумулирующих электростанций и приливных электростанций;

водосбросные, водоспускные и водовыпускные сооружения, туннели, каналы, насосные станции, судоходные шлюзы, судоподъемники, доки;

сооружения, предназначенные для защиты от наводнений;

сооружения, предназначенные для защиты от разрушений берегов морей и озер, берегов и дна рек и водохранилищ;

устройства защиты от размывов на каналах;

струенаправляющие и оградительные сооружения;

сооружения (дамбы), ограждающие золо- и шлакоотвалы и хранилища жидких отходов промышленных и сельскохозяйственных организаций;

набережные, пирсы, причальные сооружения портов;

сооружения морских нефтегазопромыслов, системы гидротранспорта отходов и стоков, системы подачи осветленной воды, сооружения систем технического водоснабжения, за исключением объектов централизованных систем горячего водоснабжения, холодного водоснабжения и (или) водоотведения, предусмотренных в федеральном законе [3].

В период активного использования водоема уровень воды в нем был выше примерно на 1,5 м. На это указывает обрыв переработанного берега (рис. 4).



Рис. 4. Разрушение откоса под действием ветро-волновой эрозии

Обследование плотины выполнялось в 1980 году, а введен в эксплуатацию объект был в 1975 году [2]. Откос плотины подвергался воздействию ветро-волновой эрозии и был частично размыт. Объемы разрушений зафиксированы в работе [2]. В настоящее время водоем в качестве источника водоснабжения не используется, однако земляная насыпь (плотина) находится под напором (2,0 м) из-за разницы отметок между верхним и нижним бьефом. Верхний бьеф – отметка воды в водоеме, нижний – отметка воды в реке.

В период обследования объект находился в стабильном состоянии. Не наблюдалось обрушений, способных вызвать прорыв воды в нижний бьеф. Тем не менее все гидротехнические сооружения, независимо от класса ответственности, должны находиться под постоянным наблюдением (см. п. 6.2 источника [1]). В отношении сооружений, являющихся бесхозным имуществом, не соблюдаются меры безопасности, своевременно не проводятся ремонтно-восстановительные мероприятия для поддержания их в исправном состоянии.

Наряду с традиционными показателями, для оценки эксплуатационных качеств системы необходимо иметь представление о количественной характеристике надежности. Она должна быть установлена, рассчитана на основе анализа поведения основных параметров системы при ее эксплуатации.

Надежность может быть определена как способность мелиоративной системы обеспечивать и сохранять при эксплуатации значение заданных показателей в течение всего срока эксплуатации в границах установленных допусков либо как способность системы безотказно работать в течение определенного времени при заданных условиях эксплуатации.

Если своевременно не поставить на учет бесхозное гидротехническое сооружение, то не будет обеспечена его безопасность, а следовательно, не будет обеспечена защита жизни, здоровья и законных интересов людей, а также защита окружающей среды и хозяйственных объектов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 58.13330.2019 Гидротехнические сооружения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564542210> (дата обращения: 10.10.2024).
2. Курбатов Н.П. Рациональный профиль низконапорных земляных плотин для мелиоративных систем Нечерноземья. Дисс... канд. техн. наук. М., 1987. 199 с.
3. О водоснабжении и водоотведении: Федер. закон от 07.12.2011 № 416-ФЗ. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_122867/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_122867/) (дата обращения: 10.10.2024).

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

*КУРБАТОВ Николай Павлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики, теплотехники и гидропривода, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: [kurbatov.nikolai@gmail.com](mailto:kurbatov.nikolai@gmail.com)

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Курбатов Н.П. Эксплуатация и обслуживание мелиоративных гидротехнических сооружений, не задействованных в народном хозяйстве // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 4 (24). С. 10–14.

**OPERATION AND SERVICE OF MELIORATION HYDRAULIC STRUCTURES  
NOT INVOLVED IN THE NATIONAL ECONOMY***N.P. Kurbatov**Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article is devoted to the analysis of operation of low-pressure hydraulic structure, created for irrigation of agricultural crops. It is noted that at present the structure is not in operation, there is a small head in front of the dam in the upper embankment, but the emergency situation can lead to human casualties.

**Keywords:** hydraulic structures, melioration dams, wind-wave erosion dam slopes, repair and restoration work, reliability.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

*KURBATOV Nikolai Pavlovich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics, Thermal Engineering and Hydraulic Drive, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kurbatov.nikolai@gmail.com

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Kurbatov N.P. Operation and service of melioration hydraulic structures not involved in the national economy // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 10–14.

УДК 691.328

**ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ  
В БЕТОННЫХ КОЛЬЦАХ КОЛОДЦЕВ ВОДОПРОВОДА И КАНАЛИЗАЦИИ***Ю.Ю. Курятников**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Курятников Ю.Ю., 2024

**Аннотация.** В статье отмечено, что воздействия агрессивных веществ, находящихся в грунтовых водах и канализационных стоках, могут привести к разрушению бетона и стальной арматуры в железобетонных изделиях. В частности, таким воздействиям подвергаются бетонные кольца колодцев водопровода и канализации. Представлено одно из решений данной проблемы, обоснована возможность применения стеклокомпозитной арматуры для колец колодцев с целью повышения их долговечности. Доказано, что стеклокомпозитная арматура может быть альтернативой стальной арматуре без ухудшения механических характеристик колец колодцев.

**Ключевые слова:** кольца колодцев, стеклокомпозитная арматура, коррозия арматуры, испытания на прочность и трещиностойкость.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-14-19**

Разрушение железобетонных изделий и конструкций из-за коррозии стальной арматуры – одна из важных проблем, с которой столкнулась строительная отрасль. Процесс коррозии арматуры начинается с образования в бетоне трещин, возникающих из-за механических и атмосферных воздействий. Через трещины проникают соли и вода, и под действием образующейся на арматуре ржавчины начинается процесс так называемого «отстреливания бетона». Это приводит к дальнейшему оголению арматуры и разрушению конструкции. Коррозионно-устойчивые композитные арматурные стержни могут обеспечить защиту объектов гражданской и промышленной инфраструктуры от воздействия коррозии. Высококачественные композитные стержни являются решением проблемы армирования и альтернативой традиционной стали, которая используется в бетонных конструкциях в агрессивной среде [1].

Композитная арматура была изобретена еще в 1960-х годах, однако до сих пор не получила большого распространения. Связано это с тем, что пока не существует государственного стандарта на сборные бетонные изделия с использованием композитной арматуры, который включал бы требования к качеству продукции [2]. Согласно СП 295.1325800.2017, композитную полимерную арматуру рекомендуется применять для армирования конструкций из бетона при строительстве объектов дорожно-транспортной и городской инженерной инфраструктуры, сельскохозяйственного назначения, химических производств, токсичных захоронений, водоподготовки и водоочистки; при строительстве шахт, тоннелей, сооружений, эксплуатируемых в условиях высоких электромагнитных полей, морских и припортовых сооружений; для армирования фундаментов, трубопроводов, опор линий электропередач и других конструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных сред.

Композитная арматура представляет собой стержни из стеклянных, базальтовых, углеродных или арамидных волокон, пропитанных терморезактивным или термопластичным полимерным связующим. Для обеспечения более прочного сцепления арматуры с бетоном на поверхность стержня наматывается тонкий шнур, который состоит из того же материала, или наносится песчаное напыление. Материалы, применяемые для изготовления композитной арматуры, должны соответствовать требованиям нормативных актов, иметь сопроводительную документацию.

По типу непрерывного армирующего наполнителя композитную арматуру подразделяют:

- на стеклокомпозитную (сокращенно – АСК);
- базальтокомпозитную (АБК);
- углекомпозитную (АУК);
- комбинированную композитную (АКК).

Достоинства композитной арматуры:

- 1) материал химически инертен, вследствие чего воздействие воды и агрессивных веществ не является разрушающим;
- 2) снижается себестоимость изделий по сравнению со стальной арматурой [3];
- 3) наблюдается низкая теплопроводность материала, способствующая улучшению энергосберегающих характеристик конструкции;
- 4) является диэлектриком, поэтому изделие не подвергается разрушающему воздействию блуждающих токов и электромагнитных полей;
- 5) прочность на растяжение композитного стержня в 2–2,5 раза выше, чем стального.

Недостатки композитной арматуры:

1) модуль упругости композитной арматуры в 4 раза ниже, чем стальной, поэтому там, где стальная арматура предохраняет бетон от появления трещин, композитная продолжает сгибаться, что приводит к образованию трещин;

2) существуют сложности при использовании на строительной площадке, связанные с невозможностью гибки с малым радиусом в условиях стройки. Гнутые стержни необходимо заранее заказывать при производстве;

3) невозможно сваривать арматурный каркас. Применяется способ вязки, что замедляет сроки строительства;

4) снижается прочность при растяжении после выдержки в щелочной среде;

5) имеет низкую термостойкость. Стекловолокно устойчиво к высокой температуре, однако связующий ее полимер может терять прочность при нагреве выше  $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$  [4].

Цель исследований заключалась в обосновании возможности применения стеклокомпозитной арматуры в качестве рабочей (рассчитываемой) для колец колодцев водопровода и канализации (рис. 1). Был выполнен расчет изделия по группам предельных состояний, а также проведены испытания на прочность и трещиностойкость в соответствии с требованиями ГОСТ 8829-2018. Для осуществления испытаний отобрали кольцо КС 10-9, изготовленное в соответствии с серией 3.900.1-14.1, с заменой стальной сетки на сетку из стеклокомпозитной арматуры (рис. 2). Использовался проектный класс бетона колец по прочности на сжатие В15. На день испытаний фактическая прочность бетона изделия составила 19,8 МПа (103 % от требуемой прочности). Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 8829-2018 и ГОСТ 8020-2016 на готовом изделии длиной 0,89 м. Нагружение кольца при испытании производилось в соответствии со схемой (рис. 3), т.е. при помощи гидравлической установки ступенями с давлением на каждой 251 кгс. Нагрузку наращивали равномерно и выдерживали кольцо под ней в течение 10 мин (таблица). Стенд для испытания представлен на рис. 4.



Рис. 1. Кольцо колодца КС 10-9



Рис. 2. Сетка из стеклокомпозитной арматуры



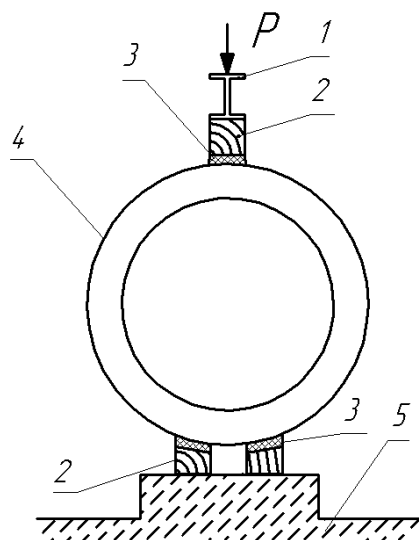


Рис. 3. Схема испытания:  
1 – стальная траверса; 2 – деревянный брус;  
3 – цементно-песчаный раствор;  
4 – испытываемое кольцо;  
5 – неподвижное основание



Рис. 4. Испытание кольца колодца на стенде

#### Нагрузки при испытании кольца колодцев

№ ступени	Полезная нагрузка от одной ступени, кгс	Показание манометра, кгс/см <sup>2</sup>	Суммарная полезная нагрузка, кгс	Контрольные нагрузки, кгс (по проекту)	Опытная ширина раскрытия трещин, мм
1	251	5	251		
2	251	10	502		
3	251	15	753		
4	251	20	1 004		
5	251	25	1 255		
6	251	30	1 506		
7	251	35	1 757		
8	251	40	2 008		
				$P_{\text{контр}} = 2\ 100$	
9	102	42	<b>2 110</b>		<b>0,1</b>
10	50	43	<b>2 160</b>	Разрушение	

Контрольная нагрузка по прочности для данного кольца с учетом собственного веса составляла 2 100 кгс. При нагрузке, равной 2 110 кгс, образовались первые трещины в растянутых зонах (сверху и снизу на внутренней поверхности, сбоку на наружной поверхности), ширина раскрытия составляла 0,10 мм. При выдержке под нагрузкой 2 110 кгс в течение 30 мин не наблюдалось признаков потери несущей способности кольца. В ходе дальнейшего увеличения воздействия происходило нарастание ширины раскрытия трещин без увеличения воспринимаемой нагрузки с последующим разрушением. Разрушение кольца произошло под нагрузкой 2 160 кгс.

В результате выполненной работы было установлено, что кольцо при данном армировании стеклокомпозитной арматурой прошло испытание на трещиностойкость, так как до контрольной нагрузки появления и раскрытия трещин не наблюдалось. Первые трещины образовались при нагрузке, равной 2 110 кгс. Кольцо прошло также и испытание на прочность, поскольку максимальная воспринимаемая нагрузка перед разрушением составила 2 110 кгс, что больше контрольной нагрузки, составляющей 2 100 кгс. Применение композитной арматуры в бетонных кольцах водопровода и канализации повышает долговечность данных изделий за счет стойкости арматуры к агрессивным воздействиям веществ, находящихся в грунтовых водах и канализационных стоках. Кроме того, замена стальной арматуры на композитную существенно снижает себестоимость данных изделий и не требует использования многоточечных сварочных машин для изготовления стальной сетки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение неметаллической композитной стеклопластиковой и базальтопластиковой арматуры ROCKBAR производства ООО «Гален» в строительстве: метод. пособие / отв. исполнитель И.Н. Тихонов. М.: НИЦ Строительство, 2013. 58 с.
2. Уманский А.М., Беккер А.Т. Перспективы применения композитной арматуры // *Вестник инженерной школы ДВФУ*. 2012. № 2 (11). С. 7–13.
3. Рахронов А.Д., Соловьев Н.П. Предложения по применению композитной арматуры в каркасах зданий // *Вестник СибАДИ*. 2013. Вып. 5 (33). С. 69–74.
4. Имомназаров Т.С., Аль Сабри Сахар А.М., Дирие М.Х. Применение композитной арматуры // *Системные технологии*. 2018. № 27. С. 24–29.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Курятников Ю.Ю. Применение композитной арматуры в бетонных кольцах колодцев водопровода и канализации // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 4 (24). С. 14–19.

**APPLICATION OF COMPOSITE REINFORCEMENT IN CONCRETE RINGS  
OF WATER SUPPLY AND SEWAGE WELLS***Yu.Yu. Kuryatnikov**Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article notes that the effects of aggressive substances in groundwater and sewage can lead to the destruction of concrete and steel reinforcement in reinforced concrete products. In particular, concrete rings of water supply and sewerage wells are exposed to such effects. One of the solutions to this problem is presented, the possibility of using glass composite reinforcement for manhole rings to increase their durability is substantiated. It is proved that glass composite reinforcement can be an alternative to steel reinforcement without deterioration of mechanical characteristics of manhole rings.

**Keywords:** well rings, fiberglass reinforcement, reinforcement corrosion, strength and crack resistance testing.

**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. Application of composite reinforcement in concrete rings of water supply and sewage wells // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 14–19.

**УДК 69:621.373.826****ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ***Ю.Н. Москвина, А.В. Крутских**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Москвина Ю.Н., Крутских А.В., 2024

**Аннотация.** В статье рассмотрено использование лазерных технологий в строительной отрасли, значительно меняющее подход к проектированию и возведению объектов. Отмечено, что применение лазера не только позволяет оптимизировать рабочий процесс, но и способствует созданию более устойчивых, безопасных и эффективно управляемых объектов, меняет облик строительной отрасли в целом. Указано, что современными направлениями использования лазера являются дистанционная резка при демонтаже конструкций, лазерная обработка материалов, лазерное сканирование объектов.

**Ключевые слова:** строительство, лазер, демонтаж, лазерная обработка, прототипирование, лазерное сканирование.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-19-23**

Одним из перспективных направлений улучшения эффективности строительства объектов и роста качества строительной продукции является применение технологий с использованием лазера. Эти технологии позволяют повышать организационно-технологический уровень строительного производства, получать высокоточные геодезические измерения, развивать систему информационного моделирования.

Рост интереса к лазерным технологиям также связан с потенциальной значимостью их использования в архитектурных и дизайнерских решениях, где точность и эстетика выходят на первый план.

#### ***Применение лазера при демонтажных работах***

Эффективным технологическим инструментом является применение лазеров при демонтаже конструкций. Разработанный специалистами научного дивизиона государственной корпорации «Росатом» мобильный лазерный комплекс (МЛК) позволяет производить работы по дистанционной разделительной резке металлоконструкций толщиной до 300 мм при помощи лазерного излучения с расстояния до 200 м при температуре от  $-50$  до  $+40$  °С. Комплекс введен в эксплуатацию в 2020 году.

Впервые МЛК использовали для демонтажа кранов-перегрузателей ТЭЦ в г. Кургане (рис. 1). Были разрезаны несущие опоры двух кранов высотой до 40 м и грузоподъемностью до 32 т [1].

Демонтаж зданий и сооружений относится к работам повышенной опасности, когда возможно обрушение и падение незакрепленных конструкций. Применение спецтехники связано со сложностями при ее транспортировке и значительно увеличивает стоимость работ. Метод лазерной резки является более безопасным способом по сравнению с классическими технологиями, а также позволяет сократить продолжительность работ и снизить затраты. Применение лазерной резки также актуально для работ на опасных и сложных объектах.

#### ***Лазерная обработка металлических труб***

Современные технологии резки труб (рис. 2) значительно изменили подход к обработке металлических изделий. Лазерная резка, имеющая высокую степень автоматизации, позволяет быстро и точно обрабатывать трубы различных форматов и материалов, включая оцинкованную и нержавеющую сталь. Применение лазеров мощностью более 3 000 Вт обеспечивает высокоскоростную резку, что особенно актуально для толстостенных труб.



Рис. 1. Демонтаж кранов-перегрузателей в г. Кургане с помощью МЛК



Рис. 2. Лазерная резка труб

Технология лазерной резки устраняет многие недостатки традиционных методов, такие как временные затраты при механической резке, а также дает возможность выполнять сложные операции, включая сверление и контурную резку. Использование программного обеспечения и автоматизации производства позволяет значительно повысить качество работ, ускорить технологический процесс и значительно снизить вероятность допущения ошибок.

#### ***Лазерная обработка неметаллических строительных материалов***

Благодаря современным технологиям, основанным на применении лазера, можно обрабатывать не только металл, но и такие материалы, как стекло, керамика и камни. Лазеры настраиваются на разные длины волн (в зависимости от задачи и материала) [2]. Более низкие длины дают возможность получить более аккуратную и качественную резку без значительного образования пыли. Кроме того, активное применение компьютерного моделирования и автоматизации процессов лазерной резки становится решением проблемы ручного управления, что позволяет снизить трудозатраты и повысить безопасность труда.

Устойчивое сочетание традиционных методов и современных технологий может стать залогом успешного развития строительной отрасли.

#### ***Построение моделей и прототипирование***

Построение моделей и прототипирование дают возможность создавать сложные геометрические формы и детали, что не позволяют сделать традиционные способы, а также протестировать рабочую модель. Для реализации этой технологии используются современные лазерные технологии, с помощью которых удастся значительно сократить финансовые и временные затраты и получить максимально высокое качество продукции.

Процесс производства моделей начинается с разработки цифрового проекта на основе технологии трехмерного лазерного сканирования. На базе проекта создаются команды для лазерных резаков.

Прототипы становятся важным этапом при принятии решений, позволяют выявить возможные недостатки и внести необходимые и своевременные коррективы в проект. Этот процесс значительно снижает риски и затраты на этапе строительства, повышая качество конечного продукта. Таким образом, можно сказать, что лазерная резка формирует будущее архитектурного дизайна и инженерных решений.

Создание прототипа на 3D-сканере имеет свои особенности:

выборочное лазерное спекание, когда послойно наносится специальный состав с последующим запеканием за счет воздействия лазера;

ламинирование, предусматривающее послойное наклеивание пленки, которая в процессе нанесения обрезается при помощи лазерной установки [3].

#### ***Лазерные инструменты***

Важно отметить, что лазерное строительное оборудование значительно упрощает решение различных задач в строительстве и ремонте. Например, ротационные лазеры идеально подходят для больших площадей, где необходима разметка уровней на значительных расстояниях. Их способность создавать горизонтальные и вертикальные плоскости позволяет строителям точно выровнять стены, потолки и другие элементы конструкции. Секторные лазеры подходят для более специфических задач, таких как установка окон или дверей, благодаря их способности проецировать несколько плоскостей одновременно. Кросслайнеры, активирующие сразу несколько взаимоперпендикулярных

линий, облегчают процесс разметки, позволяют избежать лишних замеров и визуальных ошибок.

Таким образом, выбор лазерного оборудования должен зависеть от конкретных потребностей проекта. Специалисты, обладающие информацией о характеристиках инструментов, могут оптимально применять их в зависимости от требований к точности и сложности работ [4].

#### ***Мобильное лазерное сканирование***

Использование лазерного сканирования значительно увеличивает точность и скорость выполнения работ в строительстве и других отраслях. Важным аспектом является возможность быстро получать 3D-модели объектов, что позволяет специалистам более эффективно выполнять анализ и планирование. Когда лазерный сканер фиксирует координаты каждой точки, создается подробная цифровая карта местности, отражающая актуальное состояние объекта. Сравнение этих данных с первоначальными проектными решениями дает возможность не только контролировать соблюдение стандартов и норм, но и вносить необходимые коррективы на ранних стадиях работы. Это особенно актуально в крупных проектах, где минимизация ошибок и отклонений может сэкономить ресурсы и время.

Лазерное сканирование также дает возможность архивировать информацию, благодаря чему создаются исторические базы данных для последующего анализа. Интеграция полученных данных с другими методами геодезии и проектирования открывает новые горизонты для комплексного подхода к управлению строительными проектами, обеспечивая лучшую координацию действий различных специалистов и более высокую эффективность процесса [5].

Применение лазера в строительстве революционизировало многие аспекты проектирования и выполнения строительных работ. Современные лазерные технологии позволяют достигать высокой точности в измерениях и разметке, что способствует существенному росту качества и увеличению скорости выполнения операций. Кроме того, лазеры используются для создания трехмерных моделей и прототипирования, а это значительно упрощает процесс проектирования. За счет лазерной резки и сварки материалов создаются механические конструкции, отличающиеся высокой прочностью и аккуратностью. Данные технологии сокращают время обработки, позволяют создавать сложные формы, которые были бы труднодостижимы при использовании традиционных методов.

Внедрение лазерных технологий в строительстве не только повышает эффективность и безопасность работ, но и способствует сокращению затрат на материалы и труд. Это делает лазерную технологию чрезвычайно важным элементом современного строительства.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Лазерную установку «Росатома» впервые использовали для демонтажа высотных металлоконструкций. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2024/08/14/148520> (дата обращения: 21.09.2024).
2. Применение лазерной резки в строительных материалах. URL: <https://www.teyuchiler.com/ru/application-of-laser-technology-in-building-materials> (дата обращения: 21.09.2024).

3. Моделирование и прототипирование на 3D-принтере. URL: <https://3dcast.ru/modelirovaniye-i-prototipirovaniye/> (дата обращения: 21.09.2024).
4. Лазеры в строительстве. URL: <https://www.postroil.com/poleznye-sovety/4550-lazery-v-stroitelstve.html> (дата обращения: 30.10.2024).
5. Лазерное сканирование в интересах авторского надзора и контроля строительства. URL: <https://acropol-geo.ru/o-texnologii/119-kontrol-stroitelstva> (дата обращения: 21.09.2024).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*МОСКВИНА Юлия Николаевна* – 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: [julim@yandex.ru](mailto:julim@yandex.ru)  
*КРУТСКИХ Андрей Викторович* – старший преподаватель кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: [mister.krutskih@mail.ru](mailto:mister.krutskih@mail.ru)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Москвина Ю.Н., Крутских А.В. Использование лазерных технологий в строительной отрасли // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 4 (24). С. 19–23.

---

## THE USE OF LASER TECHNOLOGIES IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

*Yu.N. Moskvina, A.V. Krutskikh*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article considers the use of laser technologies in the construction industry, significantly changing the approach to the design and construction of objects. It is noted that laser application not only allows to optimize the working process, but also contributes to the creation of more stable, safe and effectively managed objects, changes the image of the construction industry as a whole. It is pointed out that modern directions of laser use are remote cutting during dismantling of structures, laser processing of materials, laser scanning of objects.

**Keywords:** construction, laser, dismantling, laser processing, prototyping.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*MOSKVINA Yulia Nikolaevna* – 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: [julim@yandex.ru](mailto:julim@yandex.ru)  
*KRUTSKIKH Andrey Viktorovich* – Senior Lecturer at the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: [mister.krutskih@mail.ru](mailto:mister.krutskih@mail.ru)

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Moskvina Yu.N., Krutskikh A.V. The use of laser technologies in the construction industry // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 19–23.

УДК 666.9-1

**РОЛЬ ДОБАВКИ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА  
В КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТАХ*****В.Б. Петропавловская<sup>1</sup>, Т.Б. Новиченкова<sup>1</sup>, К.С. Петропавловский<sup>1</sup>,  
М.С. Зверев<sup>2</sup>, Р.З. Цыбина<sup>1</sup>***<sup>1</sup>*Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*<sup>2</sup>*Московский автомобильно-дорожный государственный  
технический университет (МАДИ) (г. Москва)*© Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б.,  
Петропавловский К.С., Зверев М.С., Цыбина Р.З., 2024

**Аннотация.** Исследование посвящено теме создания высокодисперсного минерального комплекса для формирования коррозионно-стойкого цементного камня с уплотненной структурой и высокими эксплуатационными свойствами. Введение высокоактивной добавки с высоким содержанием аморфной фазы положительным образом отражается на структуре цементного камня, получаемой на основе обычного портландцемента. В составе образующегося в результате гидратации цемента пространства между продуктами гидратации и частицами непрореагировавшего цемента заполнены воздушными порами и дисперсионной средой, включающей ионы кальция, натрия, калия, ОН-групп, а также участвующей в процессах структурообразования цементного камня. Введение фазы микрокремнезема в соответствующей пропорции отражается на формировании порового пространства и свойствах получаемого искусственного камня. Изучены свойства цементных составов с оптимальной рецептурой для использования в дорожном строительстве.

**Ключевые слова:** портландцемент, микрокремнезем, структура, поровое пространство.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-24-30*****ВВЕДЕНИЕ***

Область применения дорожных бетонов расширяется с каждым годом, и это связано с увеличением объемов дорожного строительства. Развивается направление строительства высококачественных бетонных дорог, поэтому рост качества дорожных бетонов является важной задачей [1]. Известные подходы к проектированию дорожных бетонов и технологиям их изготовления бывают недостаточно эффективны. Для решения данной проблемы проводятся научные исследования, направленные на получение инновационных материалов при использовании зарекомендовавших себя премиксов, добавок, органоминеральных и минеральных модифицирующих комплексов [1–5]. Одним из таких перспективных материалов является микрокремнезем [6].

Еще в конце XX века данная высокоактивная добавка начала успешно завоевывать строительный рынок, поскольку на ее основе разрабатывались бетоны с высокими эксплуатационными свойствами. Отличительными чертами таких модифицированных бетонов являлись высокая (до 80 МПа) и сверхвысокая (свыше 80 МПа) прочность,



повышенная коррозионная стойкость и другие эксплуатационные характеристики. Они были обусловлены технологией производства высокоподвижных бетонных смесей. Помимо прочности, зачастую их отличали еще и высокие эстетические показатели [6].

Главной особенностью технологии производства названных смесей являлось применение высокоактивных добавок с высокой степенью дисперсности. Одной из них стал хорошо себя зарекомендовавший микрокремнезем, который тогда являлся малоиспользуемым в строительном производстве отходом ферросплавного производства [6]. Он представлял собой высокодисперсный порошок, состоящий из диоксида кремния, в виде частиц размером в несколько микрометров [6]. В ходе исследования цементных бетонов на основе микрокремнезема было определено основное требование к нему как к минеральному наполнителю высокопрочных бетонов – дисперсность [5, 6]. Однако с ростом популярности наполнителя снижалась экономическая эффективность его применения, что было вызвано повышением цены. Таким образом, в настоящее время ведутся работы по созданию эффективных комплексов на основе микрокремнезема с использованием местных недорогих наполнителей, в том числе из отходов промышленности [7]. Целью настоящей работы является исследование возможности применения микрокремнезема в составе комплексной добавки с использованием отходов топливной промышленности – высококальциевых зол-уноса. На первом этапе были изучены контрольные составы на основе микрокремнезема и получены основные физико-механические характеристики затвердевшего модифицированного цементного камня.

### ***МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ***

В данных исследованиях применялись обычный портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н, микрокремнезем марки МК-90, а также мелкий заполнитель – песок речной.

Приготовление готовых смесей осуществлялось в лабораторной мешалке. Все ингредиенты, входящие в составы сырьевых смесей, предварительно высушивались до постоянной массы. Далее исходные компоненты смесей в заданных пропорциях перемешивались в сухом виде до однородного состояния. Затем смеси затворяли водой комнатной температуры. Время перемешивания в лабораторной мешалке было предварительно установлено опытным путем. В соответствии с программой исследований время перемешивания было принято постоянным. Перемешивание осуществлялось до получения однородной смеси.

Формование производилось в лабораторных условиях в соответствии с требованиями ГОСТ 30744-2001.

Твердение осуществлялось во влажных условиях в течение 14 сут на первом этапе. На втором время твердения было увеличено до 28 сут.

Средняя плотность определялась путем взвешивания образцов-кубов в сухом состоянии на лабораторных весах.

Предел прочности определяли по данным разрушающей нагрузки, полученной на лабораторном прессе.

Исследование проводилось в два этапа. На каждом изучались характеристики сырьевых смесей по критерию нормальной густоты и сроков схватывания. Данные характеристики определялись стандартным методом на приборе Вика с пестиком и иглой соответственно (табл. 1).

Таблица 1

Значения сроков схватывания для составов модифицированного цементного камня

Номера составов	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Значения сроков схватывания, мин	3	2	3	2,5	2	2	2	3	2

На первом этапе была использована методика выполнения планированного эксперимента. Содержание микрокремнезема варьировалось от 0 до 40 % с шагом 20, водотвердое отношение (В/Т) составляло от 0,4 до 0,6 с шагом 0,1.

Результаты исследований средней плотности для всех составов приведены в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 2

Средняя плотность модифицированного камня

Номера составов	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	2 350,32	2 343,13	2 069,06	2 032,81	2 230,94	2 206,71	2 375,16	2 083,44	2 212,5

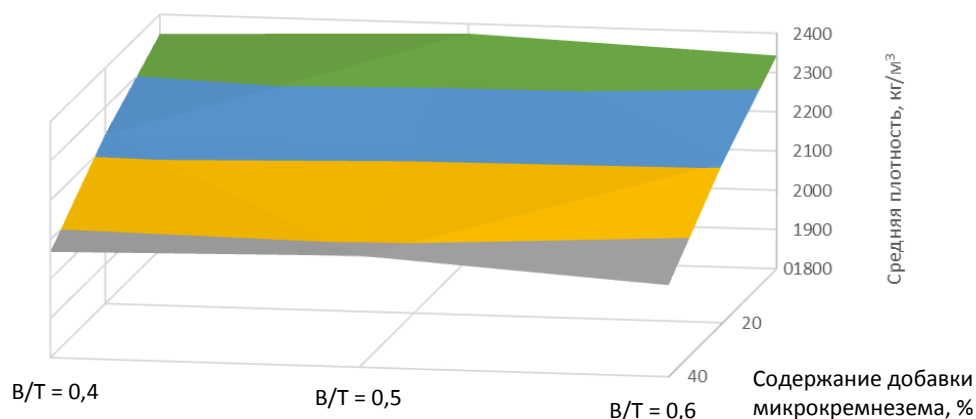


Рис. 1. Влияние добавки микрокремнезема на среднюю плотность модифицированного цементного камня после 14 сут нормального твердения

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании полученных результатов исследования прочности цементного камня с добавкой микрокремнезема была установлена зависимость  $R_{сж}$  от содержания добавки и В/Т (табл. 3, рис. 2).

Таблица 3

Предел прочности при сжатии модифицированного камня, полученный после твердения в течение 14 сут

Номера составов	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Предел прочности, МПа	87,17	34,64	21,52	15,49	49,79	22,89	54,32	32,36	26,79

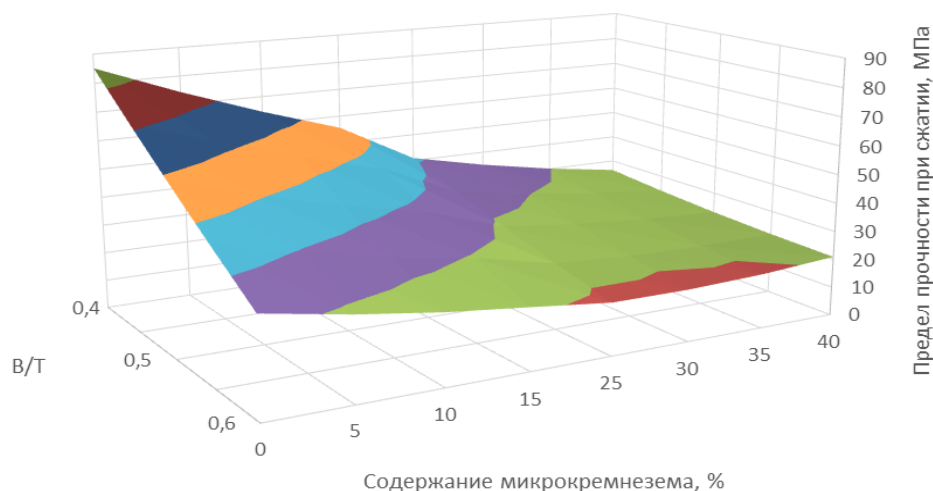


Рис. 2. Влияние добавки микрокремнезема на предел прочности модифицированного цементного камня после 14 сут нормального твердения

В ходе проведения исследований было установлено, что при увеличении содержания добавки прочность цементного камня уменьшается.

Оптимальное значение МК-90 в цементной смеси составило по результатам исследований 0,4–0,5 %.

Содержание микрокремнезема в цементной смеси на втором этапе составляло 0, 5, 10, 15 и 20 % для составов 1–5 соответственно (табл. 4).

Таблица 4

Исследованные составы цементных смесей

№	В/Т	Содержание микрокремнезема, %
1	0,14	0
2	0,14	5
3	0,15	10
4	0,16	15
5	0,16	20

Результаты исследований сырьевой смеси и физико-механических свойств цементного камня приведены в табл. 5, 6 и на рис. 3, 4.

Таблица 5

Значения диаметров расплыва цементного теста с добавкой микрокремнезема на приборе Вика

Номера составов	1	2	3	4	5
Диаметр расплыва, мм	15	21	20	17	24

Таблица 6

Значения предела прочности при сжатии  
для составов модифицированного цементного камня

Номера составов	1	2	3	4	5
Предел прочности при сжатии, МПа	30,88	25,96	24,58	23,10	22,44

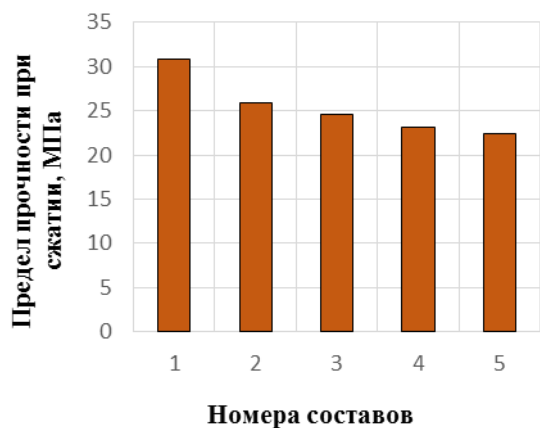


Рис. 3. Влияние добавки микрокремнезема на предел прочности при сжатии модифицированного цементного камня в возрасте 28 сут

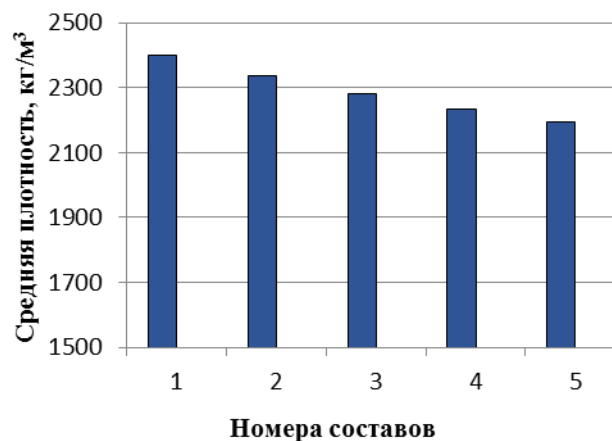


Рис. 4. Влияние добавки микрокремнезема на среднюю плотность модифицированного цементного камня в возрасте 28 сут

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований цементного камня, модифицированного добавкой высокоактивного микрокремнезема МК-90, были определены физико-механические характеристики у составов сырьевых смесей, которые можно использовать, например, для производства бордюрного камня. Полученные значения прочности и плотности цементного камня, а также другие эксплуатационные характеристики соответствуют требованиям ГОСТ Р 58894-2020. Исследования будут продолжены.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 24-49-03004).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tkach E., Rakhimova G., Slavcheva G., Aisanova M., Rakhimov M. The Influence of a Complex Additive on the Strength Characteristics of Concrete for Road Construction // *International Journal of GEOMATE*. 2023. Vol. 25, Iss. 110, pp. 243–250.
2. Sustainable Development of Basalt Fiber-reinforced High-strength Eco-friendly Concrete with a Modified Composite Binder. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01550> (дата обращения: 23.09.2024).

3. Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Aleksandrova O., Fischer H.-B. Application of Fuel Ash as a Microfiller in Cement Dispersion Systems // *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1037, pp. 729–736.
4. Performance Investigation of the Incorporation of Ground Granulated Blast Furnace Slag with Fly Ash in Autoclaved Aerated Concrete / V.A.R. Bernard [et al.] // *Crystals*. 2022. No. 12 (8), pp. 1024.
5. Новиченкова Т.Б., Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Бурьянов А.Ф., Пустовгар А.П., Петропавловский К.С. Применение пылевидных отходов базальтового производства в качестве наполнителя гипсовых композиций // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С. 9–13.
6. Смирнов А.О., Лешканов А.Ю. Влияние добавки микрокремнезема на свойства цементных композиций. *Двадцать вторые Вавиловские чтения: Материалы международной междисциплинарной научной конференции / под общ. ред. В.П. Шалаева*. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2019. Т. 2. С. 241–244.
7. Aleksandrova O., Quang N., Bulgakov B., Fedosov S., Lukyanova N., Petropavlovskaya V. The Effect of Mineral Admixtures and Fine Aggregates on the Characteristics of High-strength Fiber-reinforced Concrete // *Materials*. 2022. Vol. 15. No. 24. С. 8851.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ** Виктория Борисовна – доктор технических наук, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: victoriapetrov@gmail.com

**НОВИЧЕНКОВА** Татьяна Борисовна – 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: tanovi.69@mail.ru

**ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ** Кирилл Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник Института нано- и биотехнологий, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

**ЗВЕРЕВ** Максим Сергеевич – магистрант, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 125993, Россия, г. Москва, ул. Тверская, д. 11.

**ЦЫБИНА** Раиса Захаровна – старший преподаватель кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: kaf.kis-303@mail.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Зверев М.С., Цыбина Р.З. Роль добавки микрокремнезема в коррозионно-стойких цементных композитах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 4 (24). С. 24–30.

**THE ROLE OF MICROSILICA ADDITIVE  
IN CORROSION RESISTANT CEMENTITIOUS COMPOSITES**

**V.B. Petropavlovskaya<sup>1</sup>, T.B. Novichenkova<sup>1</sup>, K.S. Petropavlovskii<sup>1</sup>,  
M.S. Zverev<sup>2</sup>, R.Z. Tsybina<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Tver State Technical University (Tver)*

<sup>2</sup>*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (Moscow)*

**Abstract.** The research is devoted to the topic of creating a highly dispersed mineral complex for the formation of corrosion-resistant cement stone with a compacted structure and high performance properties. The introduction of a highly active additive with a high content of amorphous phase has a positive effect on the structure of cement stone obtained on the basis of ordinary Portland cement. The spaces between hydration products and unreacted cement particles formed as a result of cement hydration are filled with air pores and dispersion medium including ions of calcium, sodium, potassium, OH-groups, as well as participating in the processes of cement stone structure formation. The introduction of microsilica phase in the appropriate proportion is reflected in the formation of pore space and properties of the obtained artificial stone. The properties of cement compositions with optimal formulation for use in road construction have been studied.

**Keywords:** portland cement, microsilica, structure, pore space.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*PETROPAVLOVSKAYA Viktoriya Borisovna* – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

*NOVICHENKOVA Tatiana Borisovna* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tanovi.69@mail.ru

*PETROPAVLOVSKII Kirill Sergeevich* – Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

*ZVEREV Maxim Sergeevich* – Master's Student, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 11, Tverskaya Street, Moscow, 125993, Russia.

*TSYBINA Raisa Zakharovna* – Senior Lecturer at the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kaf.kis-303@mail.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Zverev M.S., Tsybina R.Z. The role of microsilica additive in corrosion resistant cementitious composites // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 24–30.

УДК 691.328.34:004.925.83

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА,  
МОДИФИЦИРОВАННОГО КОМПЛЕКСНЫМ МОДИФИКАТОРОМ  
И РАБОТАЮЩЕГО В СУРОВЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ***Е.В. Ткач<sup>1</sup>, Ю.С. Филимонова<sup>2</sup>, Д.Р. Янкович<sup>1</sup>, В.И. Паевский<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный  
строительный университет (г. Москва)**<sup>2</sup>Московский политехнический университет (г. Москва)*© Ткач Е.В., Филимонова Ю.С.,  
Янкович Д.Р., Паевский В.И., 2024

**Аннотация.** В статье приведены результаты исследований положительного влияния комплексного модифицирования на свойства тяжелого бетона. Исследование осуществлялось путем уменьшения содержания вяжущего (цемента) и замены его метакаолином, за счет чего повышались гидрофизические характеристики. Отмечено, что положительные результаты исследования дают возможность применять данный состав на практике для получения строительных конструкций с заданными характеристиками, а подобные конструкции могут эксплуатироваться в условиях повышенной нагрузки и агрессивной среды, в частности при строительстве тоннелей.

**Ключевые слова:** конструкции тоннелей, агрессивные факторы окружающей среды, комплексный модификатор, гидрофизические свойства, суровые условия эксплуатации.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-31-42

**ВВЕДЕНИЕ**

Тяжелый бетон является ключевым материалом при возведении тоннелей. Он обеспечивает высокую надежность и длительный срок эксплуатации сооружений. Для достижения оптимальных эксплуатационных характеристик, таких как прочность от 50 МПа и выше, плотность до 2 500 кг/м<sup>3</sup>, водонепроницаемость W10 и стойкость к агрессивным средам, применяют различные модификаторы, усиливающие структуру и долговечность бетона [1–7]. Одним из важнейших направлений совершенствования бетонных смесей является введение химико-минеральных добавок, которые позволяют улучшить физико-механические показатели бетона и сократить расход ресурсов, что особенно актуально в современных технологических условиях.

В настоящее время существенное внимание уделяется использованию таких активных минеральных добавок [7–12], как микрокремнезем, зола и метакаолин, которые способствуют формированию более плотной и устойчивой структуры бетона. Исследования показывают, что добавление метакаолина в количестве 10–15 % от массы вяжущего улучшает характеристики бетона, а именно ускоряет гидратацию и повышает прочность. В современных разработках внимание также акцентируется на использовании дисперсного армирования различными типами фибры [13–16]. За счет этого дополнительно улучшается структура и усиливается прочность бетона, он становится более устойчивым к механическим нагрузкам и износу.

Совместное использование активных минеральных добавок и суперпластификаторов представляет большой научный интерес, так как оно позволяет заметно улучшить свойства тяжелого бетона. Данный подход к модификации состава способствует увеличению прочности бетона при сжатии до 150 МПа, а также повышению его водонепроницаемости и стойкости к образованию трещин.

Таким образом, улучшение качественных характеристик тяжелого бетона остается актуальной задачей, требующей решения с учетом современных технологических направлений. Эти направления предполагают совместное использование цементного вяжущего с комплексными модификаторами для обеспечения долговечности и надежности конструкций.

### МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования проводились в строгом соответствии с общепринятыми стандартными методиками. Образцы подготавливались посерийно при соблюдении всех параметров выдержки и хранения до испытания. Общая схема исследования включала в себя логически взаимосвязанные этапы современного научного метода, в частности концептуальное планирование эксперимента с выделением наиболее важных исследуемых характеристик, определение необходимых свойств исходных компонентов, расчет требуемых дозировок каждого компонента.

Химический и минеральный состав цемента определяли при помощи рентгенофазового и рентгенофлуоресцентного анализов. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Химический и минеральный состав портландцемента

Марка цемента	Химический состав, мас. %						
	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
ЦЕМ I 42,5Н	0,83	0,6	0,88	3,9	64,1	5,89	23,8
	Содержание кристаллических фаз в клинкере, мас. %						
	C <sub>4</sub> AF (4CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		C <sub>3</sub> A (3CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		C <sub>2</sub> S (2CaO · SiO <sub>2</sub> )		C <sub>3</sub> S (3CaO · SiO <sub>2</sub> )
	11,46		6,97		11,5		60,92

Дисперсный состав, технологические и прочностные характеристики цемента определяли с помощью ситового анализа, пикнометрического метода, определения прочности на изгиб и сжатие в соответствии со стандартными методиками. Для определения механической прочности изготавливали образцы-балочки размером 4 × 4 × 16 см из цементно-песчаного раствора с водоцементным отношением В/Ц = 0,4. После изготовления образцы в формах содержали 1 сут в ванне с гидравлическим затвором, в которой обеспечивался следующий режим: относительная влажность воздуха – не менее 90 %, температура среды – 20 ± 2 °С. Через сутки образцы расформовывали и затем 27 сут хранили в ванне с водой, температуру которой контролировали в пределах 20 ± 2 °С. По истечении срока хранения образцы-балочки вынимали из ванны и не позднее чем через 30 мин испытывали на прочность. Полученные результаты приведены в табл. 2. Было установлено, что цемент соответствует требованиям стандарта по



нормируемым показателям: тесту на равномерность изменения объема, началу схватывания цементного теста, прочности при сжатии через 2 и 28 сут.

Таблица 2

Результаты определения характеристик портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н

Показатель	Требование ГОСТ 31108-2020	Фактическое значение
Остаток на сите 45 мкм, %	–	3,15
Остаток на сите 80 мкм, %	–	0,45
Нормальная плотность цементного теста, %	–	26,0
Тест на равномерность изменения объема (кольцо Ле-Шателье), расширение, мм	10	8
Удельная поверхность (по Блейну), см <sup>2</sup> /г	–	3 540
Начало схватывания, мин	Не ранее 60	168
Конец схватывания, мин	–	542
Наличие признаков ложного схватывания, да/нет	Нет	Нет
Средняя прочность на сжатие в возрасте 2 сут, МПа	Не менее 10	23,0
Средняя прочность на сжатие в возрасте 28 сут, МПа	Не менее 42,5	46,8
	Не более 62,5	
Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	–	3 162
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	–	1 256

В качестве мелкого заполнителя использовали природный песок с модулем крупности 2,5 и размером частиц от 0,16 до 2,5 мм производства ООО «Агат» (Александровский район Владимирской области).

В качестве крупного заполнителя применяли гранитный щебень производства ООО «ДорНерудРесурс» (г. Саратов), соответствующий установленным требованиям: содержание зерен пластинчатой и игловатой формы составляло 11,0 %; содержание пылевидных, илистых и глинистых частиц – 0,8 %; марка щебня по дробимости – 1 400; марка щебня по морозостойкости – 300; насыпная плотность – 1 420 кг/м<sup>3</sup>; удельная эффективная активность радионуклидов ( $A_{эфф}$ ) – 92 Бк/кг; марка щебня по истираемости – И-1. Максимум в распределении щебня по размерам приходился на 20 мм. Исследованный заполнитель относится к среднезернистому типу кристаллической структуры. Для затворения бетонной смеси использовалась вода. Она не содержала сульфатов более 2 700 мг/л (в пересчете на SO<sub>4</sub>), всех солей более 5 000 мг/л, нефтяного шлама и накипи, а содержание органических веществ было менее 15 мг/л, pH – 7,8, цвет отсутствовал.

В качестве пластифицирующей добавки использовалась добавка-суперпластификатор Sunbo PC-1021 производства Sunbo (Китай), расход которой составлял 0,4 % от массы вяжущего вещества.

В качестве водорастворимой полимерной добавки использовали добавку «Полидон-А» производства ООО «Оргполимерсинтез» (г. Санкт-Петербург), соответствующую требованиям ТУ 9365-002-46270704-2001. Расход данной добавки составлял 0,3 % от массы вяжущего. «Полидон-А» – это водный раствор поливинилпирролидона

$C_6H_9NO$  плотностью  $1\,200\text{ кг/м}^3$ , вязкостью от  $3\,000$  до  $6\,000\text{ МПа} \cdot \text{с}$  при  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , температурой плавления  $150\text{--}180\text{ }^\circ\text{C}$ .

В качестве активной минеральной добавки применялся метакаолин марки ВМК-45. Он произведен ООО «Синерго» (Челябинская обл., пос. Желтинский, ул. Степная).

Для дисперсного армирования бетонного камня был выбран волластонит, который представляет собой минерал из класса силикатов, природный силикат кальция подкласса пироксеноидов группы цепочечных силикатов с формулой  $Ca[SiO_2]$ . Цвет волластонита белый или белый с сероватым либо буроватым оттенком. Волластонит, в зависимости от длины волокон, делится на длинно- и коротковолокнистый, обладающий микроармирующим эффектом.

В табл. 3 приведены составы тяжелого бетона, на которых проводились дальнейшие исследования.

Таблица 3

## Исследуемые составы модифицированного тяжелого бетона

Материалы	Расход на $1\text{ м}^3$ бетонной смеси, $\text{кг/м}^3$ , составы бетона				
	1, контр.	2	3	4	5
ЦЕМ I 42,5Н	365	365	365	321	321
Метакаолин ВМК-45 (12 %)	–	–	–	44	44
Вода	182	182	182	182	182
Щебень	987	987	987	987	987
Песок	756	756	756	756	756
Суперпластификатор Sunbo PC-1021 (0,4 %)		1,46	1,46	1,46	1,46
Полидон-А (0,3 %)	–	–	1,09	1,09	1,09
Волластонит (2 %)	–	–	–	–	7,3

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ**

Для установления эффективности взаимодействия воды с матрицей разработанного бетона и, как следствие, эффективности диффузионных процессов внутри матрицы, влияющих на разрушение структуры бетонного камня, проводилось определение пористости бетона, его водопоглощения и водонепроницаемости. Для определения водопоглощения был применен метод последовательного насыщения образцов водой до постоянной массы согласно ГОСТ 12730.3-2020 «Бетоны. Метод определения водопоглощения». Использованные образцы-кубы имели ребро длиной  $100\text{ мм}$ , изготавливались из бетонных смесей разработанных составов. Образцы твердели в нормальных условиях на протяжении  $28\text{ сут.}$  Серия образцов для испытания включала  $3$  куба, а также контрольный для каждого из составов. Водопоглощение серии образцов каждого состава определялось как среднее арифметическое значений водопоглощений каждого образца серии. Пористость образцов разработанных составов находилась путем оценки кинетики водопоглощения методом дискретного взвешивания в соответствии с ГОСТ 12730.4-2020 «Бетоны. Методы определения параметров пористости». Образцы-кубы имели ребро длиной  $70\text{ мм}$ , серии испытаний включали два образца каждого состава. Значение пористости рассчитывалось как среднее арифметическое. Водонепроницаемость

разработанных бетонных изделий устанавливалась при помощи метода «мокрого пятна» согласно требованиям ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости». Для определения водонепроницаемости из разработанных составов изготавливались образцы-цилиндры диаметром 150 мм и высотой также 150 мм. Было подготовлено по 6 образцов каждого состава в серии. Образцы до испытания выдерживались в камере нормального твердения в нормальных условиях в течение суток. Определение водонепроницаемости проводилось при помощи установки Form+Test WE 6 MMZ (Германия). Образцы устанавливались в посадочные устройства установки, манжеты которой предварительно смазывались водонепроницаемой смазкой. Давление воды поднималось ступенчато с последующей выдержкой (0,2 МПа в течение 1–5 мин) и длительностью воздействия воды под давлением, равной 12 ч на каждой ступени. При появлении «мокрого пятна», равно как и иных признаков проникновения воды в различные места образца, испытание прекращалось. Значение максимального давления воды, при котором не менее чем на 4 образцах из 6 не наблюдалась фильтрация воды, было принято показателем водонепроницаемости образца.

Для определения морозостойкости использовался первый базовый метод. Образцы для испытания представляли собой серию бетонных кубиков с ребром длиной 100 мм, 6 из которых были приняты в качестве контрольных, а 12 имели в составе введенные добавки в соответствии с разработанным планом эксперимента. Время выдержки образцов составило 24 ч при погружении на 1/3 высоты образцов, 24 ч при погружении на 2/3 высоты образцов и 48 ч при полном погружении. Испытание продолжалось до появления структурных дефектов образцов (трещин, сколов и шелушения), потери массы и прочности образцов более чем на 5 % от требуемого значения.

Результаты испытаний на водопоглощение и водонепроницаемость бетона представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты испытаний на водопоглощение и водонепроницаемость

Маркировка образца	Плотность, кг/м <sup>3</sup> / пористость, %	Водопоглощение по массе, %	Водонепроницаемость, МПа	Марка бетона по водонепроницаемости
Состав 1, контрольный	2 290 / 12,2	4,6	0,6	W6
Состав 2 ПЦ + 0,4 % Sunbo PC-1021	2 292 / 11,3	3,2	0,8	W8
Состав 3 ПЦ + (0,4 % Sunbo PC-1021 + 0,3 % Полидон-А)	2 293 / 10,3	2,2	1,2	W12
Состав 4 ПЦ + (0,4 % Sunbo PC-1021 + 0,3 % Полидон-А + 12 % ВМК-45)	2 293 / 10,1	1,9	1,4	W14

Окончание табл. 4

Маркировка образца	Плотность, кг/м <sup>3</sup> / пористость, %	Водопоглощение по массе, %	Водонепроницаемость, МПа	Марка бетона по водонепроницаемости
Состав 5 ПЦ + (0,4 % Sunbo PC-1021 + 0,3 % Полидон-А + 12 % ВМК-45) + 2 % Волластонит	2 300 / 8,7	1,8	1,4	W14

Анализ полученных данных (см. табл. 4) показывает, что введение комплексного модификатора совместно с волластонитом (состав 5) снизило показатель водопоглощения на 57,8 %; на 37,8 % у состава 2; на 48,9 % у состава 3; на 53,3 % у состава 4, если сравнить с контрольным (составом 1). Водонепроницаемость модифицированного бетона в составе 4 повысилась на 4 степени нагружения в сравнении с контрольным составом 1. При этом наличие в составе 5 волластонита не повлияло на его водонепроницаемость.

На следующем этапе исследований определяли морозостойкость, которая зависит от структуры материала. Известно, что наличие открытых пор, доступных для проникновения воды, негативно сказывается на морозостойкости и долговечности строительных материалов [17–20]. Для проведения испытаний на морозостойкость применялся первый базовый метод по требованиям ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости». Результаты испытаний при циклическом попеременном замораживании и оттаивании отображены в табл. 5 и на рис. 1.

Таблица 5

Результаты испытания бетонов  
при циклическом попеременном замораживании и оттаивании

Маркировка образца	Потеря массы образца, %, после циклов					K <sub>мрз</sub> после циклов				
	200	300	400	500	600	200	300	400	500	600
Состав 1, контрольный	1,19	2,2	4,36	–	–	0,95	0,92	0,68	–	–
Состав 2 ПЦ + 0,4 % Sunbo PC-1021	0,36	1,09	2,1	3,3	4,88	1,02	0,98	0,95	0,87	0,84

Окончание табл. 5

Маркировка образца	Потеря массы образца, %, после циклов					$K_{\text{мрз}}$ после циклов				
	200	300	400	500	600	200	300	400	500	600
Состав 3 ПЦ + (0,4 % Sunbo PC-1021 + + 0,3 % Полидон-А)	0,25	0,99	1,87	3,1	3,9	1,02	1,00	0,97	0,93	0,87
Состав 4 ПЦ + (0,4 % Sunbo PC-1021 + + 0,3 % Полидон-А + + 12 % ВМК-45)	0,15	0,97	1,5	1,7	1,82	1,01	1,04	0,93	0,92	0,9
Состав 5 ПЦ + (0,4 % Sunbo PC-1021 + + 0,3 % Полидон-А + + 12 % ВМК-45) + + 2 % Волластонит	0,1	0,2	0,38	1,00	1,6	1,09	1,01	0,99	0,98	0,92

*Примечание.*  $K_{\text{мрз}}$  – отношение показателя прочности образца после испытания его морозостойкости к прочности образца материала в водонасыщенном состоянии до определения морозостойкости.

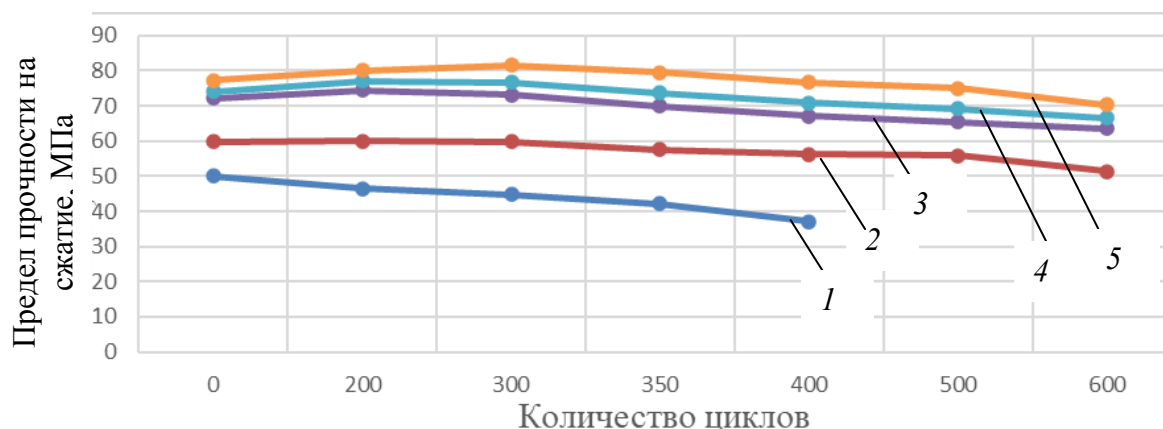


Рис. 1. Графическая интерпретация результатов испытаний образцов тяжелого бетона при циклическом попеременном замораживании и оттаивании: 1–5 – составы 1–5

Результаты испытаний при циклическом попеременном замораживании и оттаивании образцов-кубов из бетона различного состава, представленных в табл. 5 и на рис. 1, показали:

1) максимальное снижение массы до 4,36 % и кубиковой прочности на 32 % в контрольном составе 1 после 400 циклов испытаний попеременного замораживания и оттаивания, что превышает установленные показатели требования ГОСТ 10060-2012 (потеря массы и прочности бетона не более 2 и 15 % соответственно);

2) высокие характеристики морозостойкости составов, содержащих комплексный модификатор. При 600 циклах испытаний потеря массы в составах 4 и 5 оказалась 1,82 и 1,6 % при снижении прочности на 10 и 8 % соответственно, что подтверждает достаточный запас прочности и морозостойкости предлагаемых составов модифицированного бетона.

Косвенным доказательством того, что комплексное модифицирование (см. табл. 5, состав 5) способствует повышению морозостойкости бетона, могут быть результаты испытания бетонов на водопоглощение до и после испытания при циклическом попеременном замораживании и оттаивании (рис. 2).

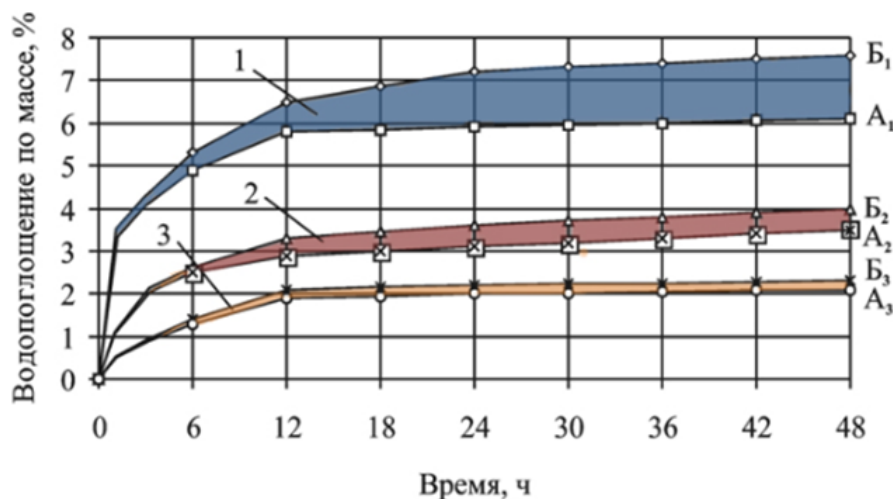


Рис. 2. Водопоглощение бетонов до и после испытания при циклическом попеременном замораживании и оттаивании:  
1 – A1 и B1 – контрольный состав 1 соответственно до и после испытания при циклическом попеременном замораживании и оттаивании;  
2 – A2 и B2 – состав 2; 3 – A3 и B3 – состав 5

Из рис. 2 видно, что после испытания на морозостойкость (300 циклов попеременного замораживания и оттаивания) исследуемые составы бетонов имеют разное увеличение водопоглощения. Прирост водопоглощения у состава 1 – 26 %, состава 2 – 12 %, состава 5 – 5–7 %.

Экспериментально доказано улучшение гидрофизических свойств: состав 5 снизил показатель водопоглощения на 60,9 % в сравнении с контрольным составом 1. Водонепроницаемость модифицированного бетона в составе 4 повысилась на 4 ступени нагружения в сравнении с контрольным составом 1. При этом наличие в составе 5 волластонита не повлияло на водонепроницаемость. Высокую морозостойкость показали

составы 4 и 5, содержащие комплексный модификатор. При 600 циклах испытания потеря массы была 1,82 % в составе 4 и 1,6 % в составе 5 соответственно. При 600 циклах испытаний в составе 4 прочность снизилась на 10 %, а в составе 5 – на 8 % соответственно.

### **ВЫВОДЫ**

Предложенное модифицирование комплексной добавкой совместно с волластонитом позволяет получить тяжелый бетон высокого качества с улучшенными гидрофизическими свойствами: водопоглощением, водонепроницаемостью и морозостойкостью. Это дает возможность рекомендовать его для производства строительных изделий и конструкций, работающих в суровых условиях эксплуатации.

Было установлено улучшение гидрофизических свойств модифицированного бетона: водопоглощение снизилось на 60,9 %; марка по водонепроницаемости повысилась на 4 ступени нагружения в сравнении с контрольным составом. После 600 циклов испытания на морозостойкость потеря массы составила только 1,5–1,8 %, а снижение прочности – 9,1–10,2 %.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Чилин И.А., Дондуков В.Г., Селютин Н.М. Модифицированные бетоны: реальность и перспективы // *Вестник НИЦ Строительство*. 2024. № 1 (40). С. 92–104.
2. Крутских А.В., Петропавловская В.Б., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б. Модифицированные цементные бетоны с дискретным армированием // *Строительство и реконструкция*. 2023. № 3 (107). С. 131–139.
3. Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Бурьянов А.Ф. Перспективы применения переработанных топливных золошлаковых отходов гидроудаления в сухих строительных смесях. Часть 1 // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 73–79.
4. Isaeva Yu.V., Velichko E.G., Kasumov A.Sh. Structure Optimization of Ultra-light Cement Mortar with Due Regard for Geometrical and Physical and Mechanical Characteristics of Components // *Construction Materials*. 2015. No. 8, pp. 84–87.
5. Yakovlev G.I., Ginuchickaya Yu.N., Kizinievlch O., Kizinievlch V., Gordina A.F. Influence of Dispersions of Multilayer Carbon Nano-tubes on Physical-mechanical Characteristics and Structure of Building Ceramics // *Construction Materials*. 2016. No. 8, pp. 20–29.
6. Величко Е.Г., Шумилина Ю.С. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 235–243.
7. Филимонова Ю.С., Величко Е.Г. Исследование комплексной модификации тяжелого бетона // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 4 (96). С. 107–109.
8. Ткач Е.В., Темирканов Р.И. Улучшение физико-механических свойств модифицированного бетона на основе применения химически активированного микрокремнезема с микроармирующим волокном // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 2 (88). С. 123–135.
9. Xu S.Q. The Comprehensive Utilization of Fly Ash // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 459, pp. 82–86. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.459.82> (дата обращения: 23.10.2024).
10. Feng N., Peng G. High Performance Concrete with High Volume Fly Ash // *Key Engineering Materials*. 2006. Vol. 302, 303, pp. 470–478.

11. Xing F., Guo X.Y., Leng F.G., Zhang R.Y. A Development of the Research on High Performance Concrete Incorporated with High Volume Fly Ash // *Key Engineering Materials*. 2006. Vol. 302, pp. 26–34. URL: [https://doi.org/ 10.4028/www.scientific.net/KEM.302-303.26156](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.302-303.26156) (дата обращения: 23.10.2024).
12. Kubissa W., Pancewska B., Wilińska I. Comparative Investigations of some Properties Related to Durability of Cement Concretes Containing Different Fly Ashes // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1054, pp. 154–161. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.154> (дата обращения: 23.10.2024).
13. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Иванов А.А. Оптимизация состава гидротехнического бетона с применением композиционных вяжущих // *Техника и технология силикатов*. 2023. Т. 30. № 4. С. 350–356.
14. Александрова О.В., Нгуен Д.В.К., Булгаков Б.И., Петропавловская В.Б. Влияние кварцевого порошка и минеральных добавок на свойства высокопрочных бетонов // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии»*. 2020. № 3. С. 7–15.
15. Урханова Л.А., Иванов А.А., Лхасаранов С.А. Исследование влияния тонкодисперсных добавок на свойства композиционных вяжущих для гидротехнического бетона // *Вестник ВСГУТУ*. 2023. № 2 (89). С. 80–89.
16. Урханова Л.А. Лхасаранов С.А., Данзанов Д.В. Синтез ультрадисперсной добавки, полученной при гидролизе портландцемента, для модификации цементного камня // *Цемент и его применение*. 2022. № 4. С. 52–56.
17. Рахимов М.А., Рахимова Г.М., Хан М.А., Тоимбаева Б.М. Разработка состава комплексной добавки полифункционального действия СС-ЗТН // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 1. С. 112–116.
18. Рахимов М.А., Рахимова Г.М., Рахимов А.М., Садирбаева А.М., Иманов Е.К. Исследование влияния комплексных гидрофобизирующих органоминеральных модификаторов на эксплуатационные свойства тяжелого бетона // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 2-2. С. 294–298.
19. Шестаков Н.И., Алексеева Д.С., Полосина Д.В. Применение фотокаталитических бетонов в дорожном строительстве // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2021. № 12. С. 16–26.
20. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Роль активных минеральных добавок природного происхождения в формировании структуры и свойств гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // *Вестник технологического университета*. 2017. № 6 (20). С. 60–63.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*ТКАЧ Евгения Владимировна* – доктор технических наук, профессор кафедры градостроительства, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: [ev\\_tkach@mail.ru](mailto:ev_tkach@mail.ru)

*ФИЛИМОНОВА Юлия Сергеевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного, гражданского и подземного строительства, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», 107023, Россия, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38. E-mail: [JuliaS06@mail.ru](mailto:JuliaS06@mail.ru)



*ЯНКОВИЧ Данило Радивоевич* – студент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: danyavkuba@gmail.com

*ПАЕВСКИЙ Василий Иванович* – студент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: 1337827@mail.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Ткач Е.В., Филимонова Ю.С., Янкович Д.Р., Паевский В.И. Исследование гидрофизических свойств тяжелого бетона, модифицированного комплексным модификатором и работающего в суровых условиях эксплуатации // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 4 (24). С. 31–42.

---

#### IMPROVEMENT OF HYDROPHYSICAL PROPERTIES OF MODIFIED HEAVY-DUTY CONCRETE WORKING IN SEVERE OPERATING CONDITIONS

*E.V. Tkach<sup>1</sup>, Yu.S. Filimonova<sup>2</sup>, D.R. Yankovich<sup>1</sup>, V.I. Paevsky<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow)*

<sup>2</sup>*Moscow Polytechnic University (Moscow)*

**Abstract.** The article presents the results of research on the positive effect of complex modification on the properties of heavy concrete. The study was carried out by reducing the content of binder (cement) and replacing it with metakaolin, due to which the hydrophysical characteristics were increased. It is noted that the positive results of the study make it possible to apply this composition in practice to obtain building structures with specified characteristics, and such structures can be operated under conditions of increased load and aggressive environment, in particular, in the construction of tunnels.

**Keywords:** tunnel structures, aggressive environmental factors, complex modifier, hydrophysical properties, harsh operating conditions.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*TKACH Evgeniya Vladimirovna* – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Urban Development, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia. E-mail: ev\_tkach@mail.ru

*FILIMONOVA Yulia Sergeevna* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial, Civil and Underground Construction, Moscow Polytechnic University, 38, Bolshaya Semenovskaya Street, Moscow, 107023, Russia. E-mail: JuliaS06@mail.ru

*YANKOVICH Danilo Radivoevich* – Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia. E-mail: danyavkuba@gmail.com

*PAEVSKY Vasily Ivanovich* – Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia. E-mail: 1337827@mail.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Tkach E.V., Filimonova Yu.S., Yankovich D.R., Paevsky V.I. Improvement of hydrophysical properties of modified heavy-duty concrete working in severe operating conditions // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 31–42.

УДК 691.328.43

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЗАЛЬТОВОЙ ФИБРЫ И ДОБАВКИ МИКРОКАЛЬЦИТА  
В СОСТАВАХ ЭФФЕКТИВНОГО БАЗАЛЬТОФИБРОБЕТОНА**

*К.А. Эквист, В.В. Белов*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Эквист К.А., Белов В.В., 2024

**Аннотация.** В статье отмечено, что бетонные тонкостенные облицовочные изделия все чаще используются в современном строительстве, в связи с чем возникает необходимость создания состава, изделия из которого, с одной стороны, должны выглядеть эстетично, а с другой – обладать рядом необходимых строительно-технических свойств. Указано, что готовые изделия отвечают жестким требованиям к прочности, трещиностойкости, морозостойкости и коррозионной стойкости. Одним из решений данной проблемы обозначено использование фиброволокна как микроармирующего компонента. Исследовано влияние базальтовой фибры и микрокальцита на характеристики бетона.

**Ключевые слова:** базальтовая фибра, микроармирующий компонент, добавка микрокальцита, базальтофибробетон.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-42-49**

**ВВЕДЕНИЕ**

В обзорной статье [1], написанной авторами настоящей работы, указано, что применение дисперсных волокон в составе бетона позволяет значительно улучшить его механические характеристики, такие как прочность, устойчивость к разрушению и деформациям. Волокна создают в бетоне дополнительные арматурные элементы, которые повышают его сцепление и прочность. Это особенно важно при производстве тонкостенных облицовочных изделий, так как они подвержены высоким нагрузкам и воздействию внешней среды.

Выбор типа волокон зависит от требований к конечному продукту. Металлические волокна, например стальные, обладают высокой прочностью и устойчивостью к деформациям, что делает их идеальным выбором для использования в бетоне. Неметаллические волокна, такие как стекловолокно и полимерные волокна, также имеют хорошие прочностные характеристики и могут быть использованы в различных условиях.

Процесс производства фиброармированного бетона требует точного дозирования волокон и их равномерного распределения по объему бетонной смеси. Для этого

применяются специальные добавки и оборудование, которые позволяют достичь оптимального соотношения между волокнами и бетонной матрицей.

Использование фиброармированного бетона в производстве тонкостенных облицовочных изделий дает возможность уменьшить толщину изделий при сохранении необходимых прочности и устойчивости. Это делает их более легкими и экономичными при транспортировке и монтаже, а также расширяет их эстетические возможности. В целом применение дисперсных волокон в производстве эффективных тонкостенных облицовочных бетонных изделий является важным шагом в развитии строительной отрасли. Оно позволяет улучшить качество и долговечность строительных конструкций, а также сократить затраты на их производство и эксплуатацию.

Номенклатура волокон, которые могут быть использованы в армировании, очень широка. Волокна изготавливаются из различных материалов, включая кремний, углерод, вольфрам, базальт, стекло, сталь и полимеры. Волокна из древесины также могут быть использованы, но они имеют некоторые ограничения в отношении конструкционной прочности. Есть возможность использования базальтовых волокон для улучшения эксплуатационных и физико-механических свойств базальтофибробетона (БФБ) [2].

Ключевыми направлениями исследований долговечности и износостойкости БФБ в различных условиях эксплуатации должны быть разработка технологических решений для получения материала с требуемыми физико-механическими характеристиками и разработка нормативных документов и руководящих материалов для проектирования и применения БФБ. Здесь необходимо сотрудничество между научными и исследовательскими учреждениями, строительными компаниями и производителями материалов. Кроме того, важно осуществлять пилотные проекты, где можно оценить эффективность и надежность БФБ в реальных условиях эксплуатации. В результате таких исследований и практической реализации БФБ можно будет получить достоверные данные о его долговечности и эксплуатационной пригодности, а также разработать технологические решения, которые позволят создавать материал с требуемыми характеристиками. Это, в свою очередь, даст возможность широко использовать БФБ в строительстве и получить все его преимущества, такие как высокая прочность, огнестойкость и стойкость к коррозии [3].

Исследования образцов из высокопрочного бетона свидетельствуют о том, что добавление в них базальтовой фибры повышает прочность бетона при растяжении на 42–48 % [4]. При этом базальтовая фибра существенно увеличивает энергоемкость разрушения мелкозернистого бетона до 2,2 раза [5].

В работе [6] при изучении влияния содержания базальтовой фибры на энергоемкость ударного разрушения после циклов замораживания и оттаивания было установлено, что энергозатраты на разрушение образцов, содержащих 2 и 4 % базальтовой фибры после 5 циклов замораживания/оттаивания, превосходят энергозатраты на разрушение образцов контрольной (неармированной) серии на 19 и 60 % соответственно. Это свидетельствует о повышении свойства морозостойкости материала, армированного базальтовым волокном.

Решением вопросов экономии, энерго- и ресурсосбережения при производстве фибробетона может стать использование техногенных отходов, в большом количестве получаемых при реконструкции и ремонте промышленных зданий и сооружений или коммуникационных сетей, где одним из основных является минеральная или стеклянная вата [7].

Как отмечено в обзоре [1], перспективным технологическим приемом при получении эффективного БФБ является использование такой дисперсной добавки-наполнителя, как микрокальцит.

В работе [8] установлено, что с повышением дисперсности микрокальцита происходит постепенное улучшение всех свойств цементного камня. Так, если прочность бездобавочного состава составляла на сжатие 53 МПа, а на изгиб – 21 МПа, то прочность состава, содержащего микрокальцит дисперсностью 300 мкм, составляла на сжатие 82 МПа, а на изгиб – 53 МПа. При введении 5 % микрокальцита и с ростом его фракции значение пористости плавно уменьшается с 7,1 до 4,8 %. При повышении дисперсности микрокальцита наблюдается уменьшение значений водопоглощения с 3,4 % для бездобавочного состава до 2,1 % для состава, содержащего микрокальцит с фракцией 300 мкм.

За рубежом также проводятся исследования свойств фибробетонов. Д. Брэнстон установил, что добавление базальтовой фибры в бетон является эффективным средством для предотвращения трещинообразования в результате снижения свободной усадки, а также замедления роста трещин, если они все же возникают [9].

В работе [10] выявлено, что добавление всего лишь 1 % фибры от массы вяжущего значительно повышает момент трещинообразования в бетоне.

Приведенные литературные источники свидетельствуют о том, что базальтовое волокно в составе фибробетона (в определенной пропорции) значительно повышает многие эксплуатационные характеристики: прочность на сжатие и изгиб, морозостойкость, трещиностойкость. Микрокальцит в составе бетона положительно влияет на прочность и плотность готового изделия, увеличивая их. Тем не менее имеются и недостатки, такие как технологические сложности производства и относительно высокая стоимость изделий.

### ***МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ***

В настоящей работе изучалось влияние базальтовой фибры (как микроармирующего компонента) на характеристики БФБ с добавкой микрокальцита для подбора оптимального состава БФБ и в том числе необходимого водоцементного отношения (В/Ц).

Были задействованы следующие компоненты:

1. Цемент ЦЕМРОС М500 ЦЕМ II А-Ш 42,5 Н.
2. Песок строительный, модуль крупности – 2,1.
3. Пластифицирующая добавка Sika ViscoCrete-200 (ПД).
4. Дисперсная добавка – микрокальцит (мраморный песок). Фракция – 0,2–0,5 мм. Твердость – 2,8 по шкале Мооса.
5. Микроармирующий компонент – базальтовая фибра CemFibra R.

### ***РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ***

В двухфакторном эксперименте на первом этапе исследований в качестве переменных факторов выбрали содержание фибры, уровни варьирования 3, 4 и 5 % от массы вяжущего, а также В/Ц с уровнями варьирования 0,4; 0,5; 0,6. Количество микрокальцита, составляющее 5 % от массы вяжущего, было принято на основе литературных данных [9]. Таким образом, использовалось 9 экспериментальных составов:

1. Цемент – 1 200 г; песок – 1 200 г; микрокальцит – 60 г (5 %); ПД – 3,6 г (0,3 %); вода – 720 мл (В/Ц = 0,6); фибра – 60 г (5 %).

2. Цемент – 1 200 г; песок – 1 200 г; микрокальцит – 60 г (5 %); ПД – 3,6 г (0,3 %); вода – 720 мл (В/Ц = 0,6); фибра – 36 г (3 %).

3. Цемент – 1 200 г; песок – 1 200 г; микрокальцит – 60 г (5 %); ПД – 3,6 г (0,3 %); вода – 720 мл (В/Ц = 0,6); фибра – 48 г (4 %).

4. Цемент – 1 200 г; песок – 1 200 г; микрокальцит – 60 г (5 %); ПД – 3,6 г (0,3 %); вода – 480 мл (В/Ц = 0,4); фибра – 48 г (4 %).

5. Цемент – 1 200 г; песок – 1 200 г; микрокальцит – 60 г (5 %); ПД – 3,6 г (0,3 %); вода – 480 мл (В/Ц = 0,4); фибра – 36 г (3 %).

6. Цемент – 1 200 г; песок – 1 200 г; микрокальцит – 60 г (5 %); ПД – 3,6 г (0,3 %); вода – 480 мл (В/Ц = 0,4); фибра – 60 г (5 %).

7. Цемент – 1 200 г; песок – 1 200 г; микрокальцит – 60 г (5 %); ПД – 3,6 г (0,3 %); вода – 600 мл (В/Ц = 0,5); фибра – 60 г (5 %).

8. Цемент – 1 200 г; песок – 1 200 г; микрокальцит – 60 г (5 %); ПД – 3,6 г (0,3 %); вода – 600 мл (В/Ц = 0,5); фибра – 36 г (3 %).

9. Цемент – 1 200 г; песок – 1 200 г; микрокальцит – 60 г (5 %); ПД – 3,6 г (0,3 %); вода – 600 мл (В/Ц = 0,5); фибра – 48 г (4 %).

Из данных составов были получены экспериментальные образцы-кубы  $10 \times 10 \times 10$  см для определения физико-механических характеристик бетона – плотности и прочности на сжатие. Далее при помощи алгоритма расчета двухфакторного эксперимента и результатов замера характеристик образцов получили объемные поверхностные диаграммы зависимости прочности на сжатие и плотности от В/Ц и количества фибры (рис. 1, 2).

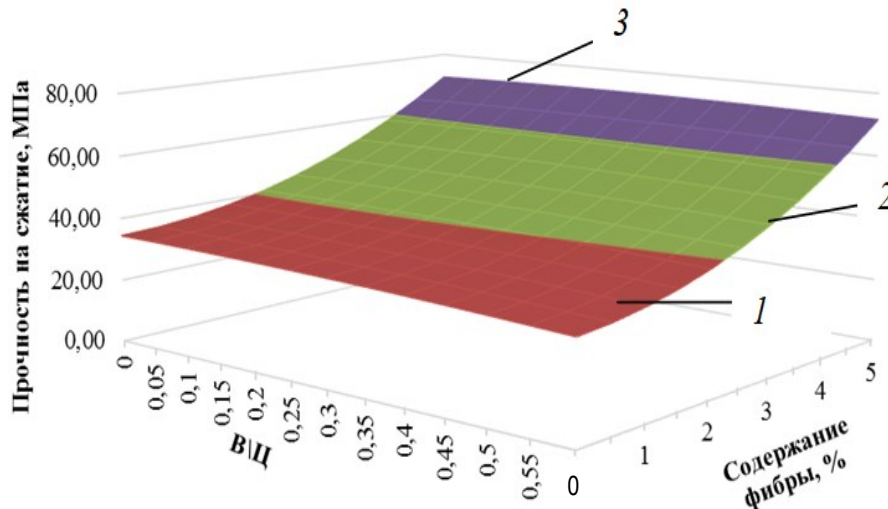


Рис. 1. Зависимости предела прочности на сжатие образцов БФБ от содержания фибры и В/Ц:  
1 – 20,00–40,00; 2 – 40,00–60,00;  
3 – 60,00–80,00 МПа

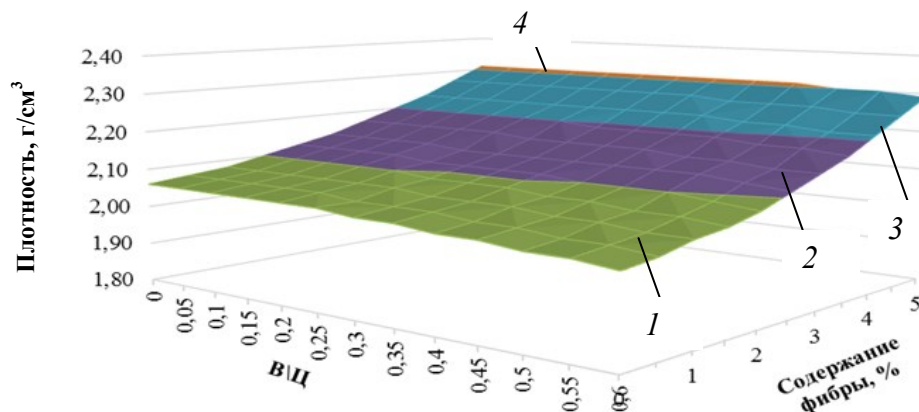


Рис. 2. Зависимости плотности образцов БФБ от содержания фибры и В/Ц: 1 – 2,00–2,10; 2 – 2,10–2,20; 3 – 2,20–2,30; 4 – 2,30–2,40 г/см<sup>3</sup>

Данные показывают, что с возрастанием количества фибры в составе прочность на сжатие и плотность увеличиваются. Кроме того, можно отметить, что увеличение В/Ц почти не влияет на прочность, в то время как плотность в таком случае падает. Момент начала понижения плотности с ростом В/Ц приходится на значение 0,4.

Оптимальное количество фибры в составе БФБ – 5 % от массы вяжущего при В/Ц = 0,4.

Из данного состава, а также контрольного состава бетона без добавления микрокальцита и базальтового волокна были изготовлены образцы-кубы  $10 \times 10 \times 10$  см для сравнительного испытания на прочность при сжатии.

Ниже приведены графики сравнения характеристик экспериментальных образцов из выявленного оптимального состава и базовых образцов без добавления микрокальцита и базальтового волокна (рис. 3, 4).

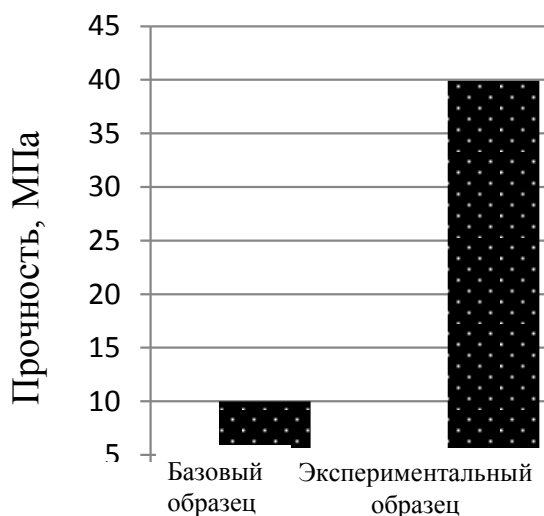


Рис. 3. Сравнение прочности на сжатие базового и экспериментального образцов

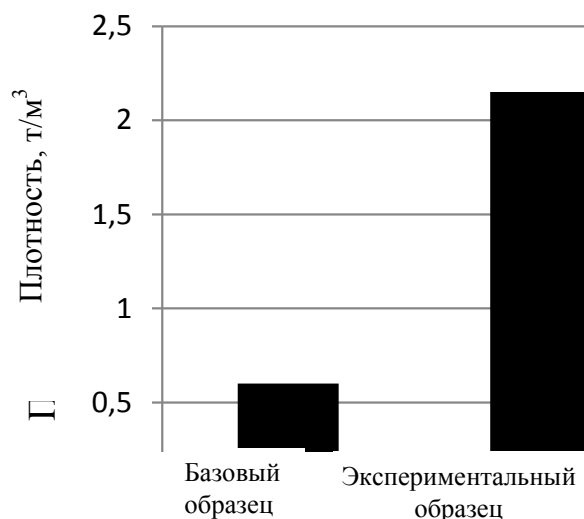


Рис. 4. Сравнение плотности базового и экспериментального образцов

Средняя прочность при сжатии БФБ оптимального состава составила 39,9 МПа, средняя плотность образцов – 2,1 т/м<sup>3</sup>, пористость – 10,7 %.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом:

1. Базальтовая фибра, благодаря своей высокой прочности и модулю упругости, обеспечивает эффективное дисперсное армирование бетона, что способствует повышению его способности выдерживать сжимающие нагрузки. Это происходит за счет того, что волокна фибры, распределяясь по всему объему бетона, создают пространственный каркас, который препятствует распространению трещин и повышает сопротивление бетона разрушению.

2. Добавление базальтовой фибры способствует уменьшению пористости бетона за счет заполнения пустот и улучшения сцепления между частицами. Это приводит к увеличению плотности бетона, что, в свою очередь, также повышает его прочность.

3. Микрокальцит, благодаря мелкому размеру частиц, способствует более плотной упаковке компонентов бетона, что уменьшает количество пустот и увеличивает плотность материала. Это достигается путем заполнения микрокальцитом пространства между более крупными частицами, такими как песок и щебень, за счет чего улучшается их сцепление и уменьшается пористость бетона.

4. Микрокальцит может способствовать улучшению гидратации цемента, что ведет к образованию более плотной и прочной кристаллической структуры цементного камня. Благодаря этому увеличивается прочность бетона при сжатии.

### **ВЫВОДЫ**

В ходе исследовательской работы было доказано положительное влияние базальтового фиброволокна и микрокальцита на характеристики бетона, а именно на прочность при сжатии и плотность. Данные компоненты существенно повышают физико-механические показатели бетона. Кроме того, на основе литературных источников, представленных выше, можно сделать вывод, что базальтовая фибра также положительно влияет на морозостойкость и трещиностойкость бетона.

Результаты настоящей работы позволяют обосновать оптимальные составы БФБ для получения эффективных тонкостенных облицовочных изделий.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Эквист К.А., Белов В.В. Эффективные фибробетонные тонкостенные облицовочные изделия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 3 (23). С. 5–12.
2. Котляревская А.В., Лубенец Я.В., Котляревский А.А. Актуальность применения базальтовой фибры в современном строительстве // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 11. С. 507–516.
3. Окольников Г.Э., Йочич М., Курлин М. Перспективы применения полидисперсно-армированных фибробетонов // *Системные технологии*. 2021. № 1 (38). С. 86–88.

4. Плевков В.С., Колупаева С.Н., Кудяков К.Л. Расчетные диаграммы нелинейного деформирования базальтофибробетона при статических и кратковременных динамических воздействиях // *Вестник ТГАСУ*. 2016. № 3. С. 95–109.
5. Алексеев К.Н., Курилко А.С., Захаров Е.В. Влияние базальтового волокна (фибры) на вязкость и энергоемкость разрушения мелкозернистого бетона // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. № 12. С. 56–63.
6. Алексеев К.Н. Влияние циклов замораживания-оттаивания на способность мелкозернистого бетона сопротивляться динамическим (ударным) нагрузкам в зависимости от содержания базальтовой фибры // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018. № 12. С. 84–91.
7. Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Ничинский А.Н. Физико-технические свойства фибробетонов с использованием вторичного минераловатного сырья // *Строительные материалы*. 2019. № 7. С. 16–20.
8. Урбанов А.В., Манушина А.С., Дмитриева Е.А., Курдюмова С.Е., Потапова Е.Н. Разработка строительной смеси для малых архитектурных форм // *Успехи в химии и химической технологии*. 2017. Т. 31. № 1. С. 25–27.
9. Branston J., Das S., Kenno S.Y., Taylor C. Influence of Basalt Fibres on Free and Restrained Plastic Shrinkage // *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 74, pp. 182–190.
10. Харун М., Коротеев Д.Д., Дхар П., Ждеро С., Елроба Ш.М. Физико-механические свойства базальто-волокнистого высокопрочного бетона // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2018. С. 396–403.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*ЭКВИСТ Кирилл Алексеевич* – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: hgfcch@gmail.com

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Эквист К.А., Белов В.В. Использование базальтовой фибры и добавки микрокальцита в составах эффективного базальтофибробетона // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 4 (24). С. 42–49.



**THE USE OF BASALT FIBER AND MICROCALCITE ADDITIVES  
IN THE COMPOSITIONS OF EFFECTIVE BASALT FIBER CONCRETE**

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

**Abstract.** In the article it is noted that concrete thin-walled facing products are increasingly used in modern construction, in connection with which there is a need to create a composition, the products of which, on the one hand, should look aesthetically pleasing, and on the other hand - have a number of necessary construction and technical properties. It is indicated that the finished products meet strict requirements for strength, crack resistance, frost resistance and corrosion resistance. One of the solutions to this problem is the use of fiber as a microreinforcing component. The influence of basalt fiber and microcalcite on concrete characteristics was investigated.

**Keywords:** basalt fiber, micro-reinforcing component, microcalcite additive, basalt fiber concrete.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*EKVIST Kirill Alekseevich* – Master’s Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: hgfcch@gmail.com

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

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Ekvist K.A., Belov V.V. The use of basalt fiber and microcalcite additives in the compositions of effective basalt fiber concrete // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 42–49.

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

УДК 621.311:004.89

**МЕТОДЫ ОБЪЯСНИМОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА  
ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ:  
ОБЗОР, ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ**

*М.А. Куликова, О.Н. Торгованова, К.Б. Корнеев*  
*Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Куликова М.А., Торгованова О.Н.,  
Корнеев К.Б., 2024

**Аннотация.** В статье рассмотрены перспективы использования методов объяснимого искусственного интеллекта (ХАИ) в сфере электроэнергетики, связанные с повышением объяснимости моделей машинного обучения и улучшением понимания их результатов. Представлены общие проблемы и ограничения, вызванные внедрением методов ХАИ в сфере энергетики и электроэнергетических систем.

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

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-50-57**

Развитие методов глубокого обучения (от англ. deep learning – DL) привело к созданию более совершенных классификаторов и алгоритмов машинного обучения (от англ. machine learning – ML), которые нашли применение в энергосистемах [1]. В некоторых случаях эти методы демонстрируют значительные преимущества перед традиционными алгоритмами оптимизации с точки зрения эффективности, устойчивости к помехам и точности.

Тем не менее, несмотря на очевидный успех названных алгоритмов, существует важная проблема. Модели ML зачастую бывают очень сложными, и оператору может быть непонятно, как и почему они принимают те или иные решения, а также каким образом они обрабатывают входящие данные. Планированием и эксплуатацией энергосистем занимаются исключительно специалисты в данной области. Они опираются на имеющиеся знания об этих системах, специализированные программы и накопленный опыт. Экспертам зачастую тяжело доверять решениям и рекомендациям, предложенным алгоритмами ML, и это ограничивает их практическое применение. Данная трудность особенно заметна в случаях, требующих высокого уровня надежности, что характерно для энергетической отрасли [2]. Верно и обратное: специалисты в области программирования алгоритмов не знают специфики работы энергосистем, поэтому не могут в полной мере организовать обучение моделей искусственного интеллекта (ИИ).

В последние годы активно разрабатываются новые подходы и концепция, направленная на повышение объяснимости и понятности результатов моделей ML. Эта

концепция получила название «объяснимый искусственный интеллект» (от англ. Explainable Artificial Intelligence – ХАИ). Цель ХАИ заключается в том, чтобы помочь исследователям, разработчикам, специалистам и пользователям лучше понимать, как работают модели ML, сохраняя при этом их эффективность и точность [3]. На рис. 1 представлены ключевые этапы, связанные как с ИИ, так и с энергетическими системами. Видно, что использование ХАИ в области энергетики находится пока что на начальном этапе.

Одним из минусов многих алгоритмов ML является их непонятность. Это значит, что такие алгоритмы трудно объяснить, даже специалисты в данной области не каждый раз могут это сделать. Если пользователи считают модель «черным ящиком», они не всегда доверяют ее прогнозам и поэтому ее не используют [4]. Кроме того, многие нейронные сети – это очень сложные модели, которые трудно понять даже экспертам в области ИИ. Их архитектура разрабатывается методом проб и ошибок и может содержать сотни уровней и миллиарды входных параметров.

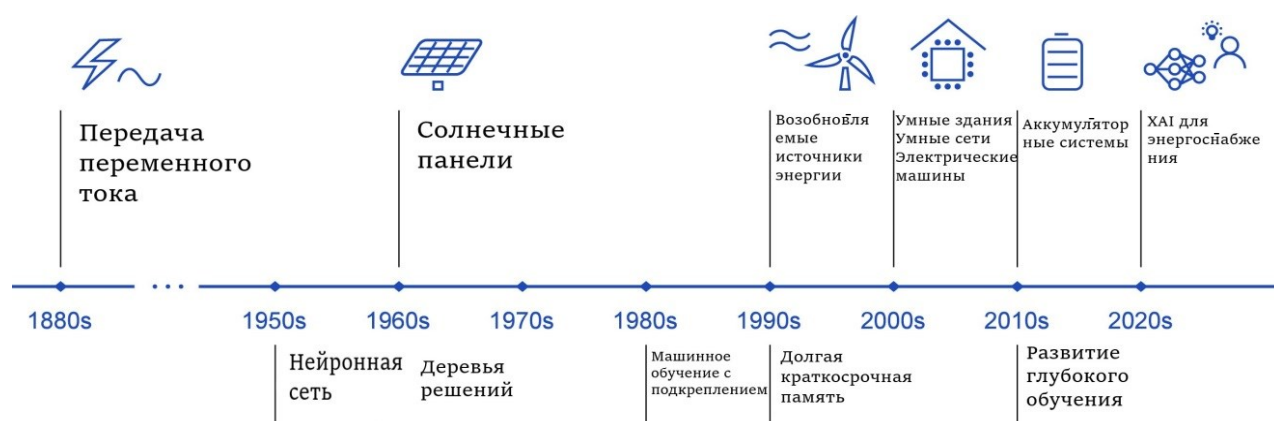


Рис. 1. Путь к ХАИ для энергетики и энергетических систем

С учетом указанной проблемы следует уточнить, что главная цель ХАИ – дать исследователям, разработчикам и пользователям возможность лучше понимать результаты моделей ML. Кроме того, предполагается, что добавление объяснимости позволит сделать обобщение моделей ML более надежным, и в дальнейшем это поможет улучшить их управляемость. Данные идеи были реализованы в сфере энергетических систем (рис. 2). На рис. 3 представлен конкретный пример оценки эффективности энергопотребления здания [5]. Здесь ХАИ используется для предоставления пользователю сведений о том, какие функции являются важными.

Есть две основные области объяснения, на которые ориентированы методы ХАИ. Первая область – это «локальное объяснение», при котором входными данными для ХАИ являются отдельные элементы входных данных, т.е. карта объяснения  $g$  генерируется каждый раз для отдельного элемента данных. Другая область – «глобальное объяснение», когда целью является понимание функционирования всей модели. Для этого используются группы наборов данных, на их основе создается объяснение  $g$ . На рис. 4 представлена общая схема локальных и глобальных объяснений.

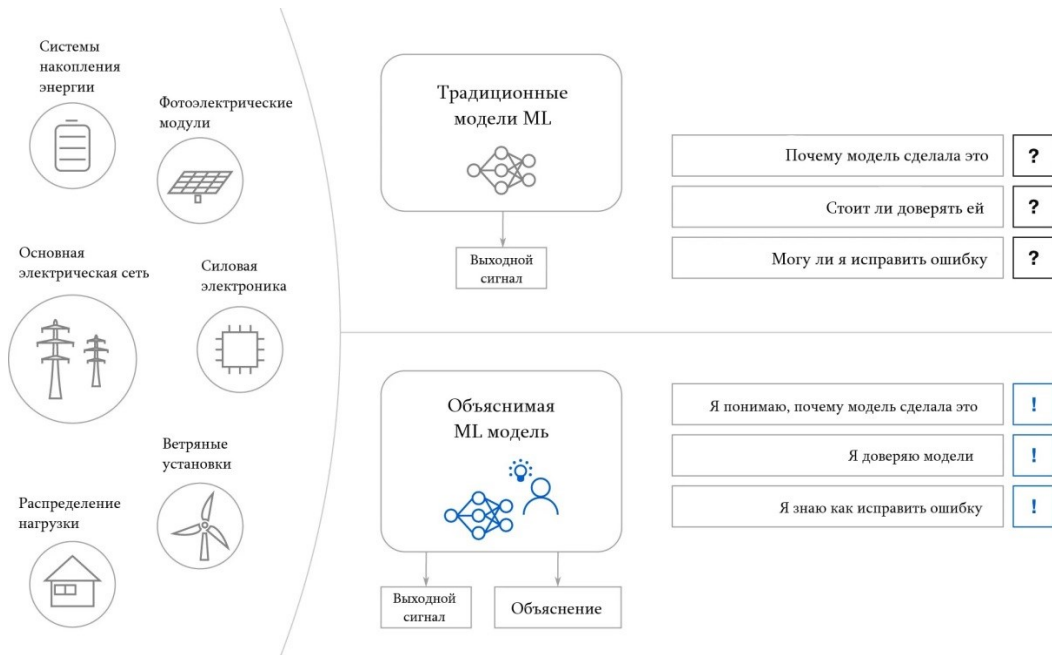


Рис. 2. Концепции XAI для общих задач энергосистем



Рис. 3. Пример модели классификатора с XAI для оценки эффективности энергопотребления в здании

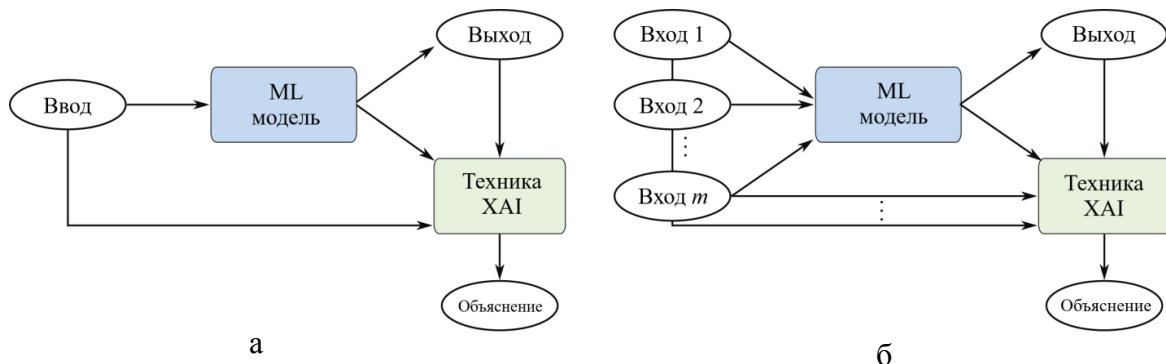


Рис. 4. Концептуальная иллюстрация объяснимых алгоритмов:  
а – локальных; б – глобальных

Еще одна важная концепция ХАИ – это интеграция объяснений в саму модель. Объяснения могут быть частью конкретной модели ML или применяться к любой модели в качестве постпроцесса. Существует два подхода к интеграции методов ХАИ: внутренний, который зависит от модели, и постспециальный, который не зависит от нее. При внутреннем подходе объяснимость становится частью архитектуры модели ML и не может быть перенесена на другие архитектуры. При постспециальном подходе метод ХАИ не связан с конкретной архитектурой и может быть применен к любой обученной модели ML. На рис. 5 показана высокоуровневая схема для внутреннего и постспециального ХАИ.

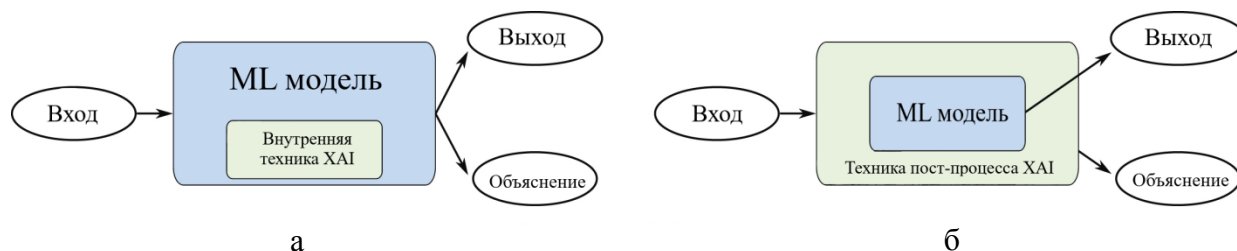


Рис. 5. Высокоуровневая иллюстрация алгоритмов объяснимой модели:  
а – внутреннего; б – постспециального

Таким образом, локальные объяснения помогают понять, почему было принято то или иное решение. Глобальные объяснения позволяют узнать систему в целом и оптимизировать ее на основе знаний, полученных моделью. Встроенные методы полезны при обучении новой модели, для которой понимание имеет ключевое значение. Специальные методы дают возможность использовать уже обученные модели или проверенные методы ML.

При внедрении ХАИ в системы электроснабжения необходимо учитывать ряд проблем и ограничений. В таблице представлено их краткое описание.

#### Существующие ограничения применения моделей ИИ в энергетике

Категория	Проблемы и ограничения
Компромиссы	Как объяснение, так и результаты должны быть точными
Стандартизация	Отсутствие согласия в определении ХАИ и объяснимости. Различные типы пользователей: исследователи ИИ, эксперты в области энергетики, разработчики энергетической политики и потребители. Должны быть даны обоснованные объяснения
Показатели оценки	Следует использовать объективные показатели, если объяснение не может быть определено. Необходимо определить и оценить показатель объяснимости
Безопасность	Вредоносные атаки могут быть сгенерированы с использованием информации, полученной с помощью методов ХАИ. Конфиденциальность моделей ML может быть нарушена

*Окончание таблицы*

Категория	Проблемы и ограничения
Пользователи	Методы ХАИ должны оптимально подходить для различных типов пользователей. Сложность сотрудничества между экспертами в области энергетики и экспертами в других областях
Рекомендации	Потребители могут быть введены в заблуждение и полагаться на недостоверные результаты. Нельзя допускать, чтобы методы ХАИ выдавали вводящие в заблуждение объяснения

Одной из главных проблем, относящихся непосредственно к сфере энергетики, является возможность использования модели, которая обеспечивает высокую производительность и при этом остается понятной [6]. Обычно точные модели бывают сложными для восприятия и понимания. Компромисс имеет особое значение в области электроэнергетики, поскольку пользователю (персоналу энергосистемы) требуется как высокая производительность, так и точное объяснение, чтобы обеспечить высокий уровень надежности.

Еще одним существенным недостатком ХАИ можно выделить отсутствие стандартизации и четких определений. В настоящее время нет единого мнения о том, как именно следует понимать ХАИ и объяснимость его работы. Некоторые исследователи сосредоточены на методах визуализации, в то время как остальные используют концепцию важности объектов или их релевантности. Одна из причин отсутствия единого стандарта заключается в том, что существуют разные типы пользователей, применяющих модели ML и ХАИ: исследователи в области ИИ, эксперты в энергетике, разработчики энергетической политики и потребители [7]. Каждый из них использует методы ML для своих нужд на основе различных факторов и уровней абстракции. Еще один важный вопрос состоит в том, как определить оптимальное объяснение. Во многих приложениях не существует четко установленного метода для предоставления понятного и оптимального объяснения. Без возможности решить эту задачу использование ХАИ может стать неясным, а результаты работы алгоритма ХАИ – трудно интерпретируемыми. Кроме того, хотя данные, как правило, содержат классификационные метки для процесса обучения, обычно не приводятся обоснованные объяснения. Без таких объяснений результаты ХАИ не будут иметь ориентира для сравнения. Таким образом, при создании баз входных данных для любого энергетического приложения важно, по возможности, включать в них обоснованные объяснения [8].

Существенным недостатком методов ХАИ является отсутствие объективных критериев оценки качества объяснений. Даже если можно дать четкое определение объяснимости, желательно иметь показатель, который оценивал бы, насколько модель «объяснима». Эти показатели должны измерять объяснимость для каждого метода ХАИ и любого классификатора. Значение оценки должно основываться на том, насколько предполагаемое объяснение соответствует обоснованию. В отличие от многих других распространенных задач ML, в области энергетики существует множество приложений, где правильное объяснение может быть четко определено (например, в задаче обнаружения и классификации аномальных событий в электросети). В этом случае объяснение может включать время возникновения события или его причину [9]. Таким

образом, объяснение можно представить в виде двоичного вектора, который показывает наличие или отсутствие события в каждый момент времени выборки. Определение оценочного показателя основывается на корректном объяснении и сравнивается с результатами, полученными с помощью ХАИ. Если объяснение не может быть точно определено, то установить объективные показатели для каждого пользователя сложно.

Еще одним критически важным аспектом, который необходимо учитывать, является информационная безопасность. В сфере энергетики и систем энергоснабжения данный вопрос стоит особенно остро. Когда применяются методы ХАИ для объяснения модели ML, конфиденциальность последней может быть нарушена из-за необходимости обработки большого объема входных данных, получаемых не только по исследуемому, но и по сторонним объектам электроэнергетики, с существующей фактической привязкой последних к смежным объектам энергосистемы. В силу наличия у системы доступа к такому объему входных данных существует некоторая вероятность обратного извлечения исходных данных, а также возможность управления системой их обработки. Любая информация, полученная с помощью методов ИИ, может быть использована для создания эффективных вредоносных атак, направленных на дезориентацию модели. Эти атаки включают, к примеру, манипулирование моделью путем предоставления системе определенных ложных данных, что приводит к искаженным результатам. Основываясь на данных, полученных с помощью ХАИ, такие атаки могут проявить себя как эффективные, поскольку они позволяют найти минимальные изменения во входных данных, необходимые для изменения решения модели ML. Последствия данных атак для электрических сетей и систем управления энергопотреблением оказываются серьезными и даже катастрофическими. Кроме того, надежность объяснений должна поддерживаться за счет постоянного получения актуальных данных о состоянии электроэнергетической системы. Открытый для систем ИИ доступ к сбору и обработке этих данных может привести к разрушению внутренней системы безопасности объекта электроэнергетики или энергосистемы в целом [10].

Другая проблема заключается в том, что современные методы, используемые для объяснения результатов работы ХАИ, разработаны с учетом потребностей экспертов в области ИИ, а не специалистов по энергетическим системам [11]. В настоящее время самые передовые алгоритмы ХАИ созданы учеными-компьютерщиками и исследователями ИИ. Таким образом, наиболее распространенным способом объяснения результатов является использование так называемых «тепловых карт», которые обеспечивают наглядность работы, но не всегда содержат достаточное количество информации для пользователя. Во многих приложениях более сложное представление выходных данных ХАИ может привести к более эффективному объяснению алгоритмов работы и принятия решений. В связи с этим было бы целесообразно наладить сотрудничество между экспертами в области энергетики и другими специалистами, чтобы создать эффективные и специализированные методы ХАИ, идеально подходящие для приложений в области энергетики. Например, в методы, где объясняются и даются рекомендации по эксплуатации электрических систем, можно было бы включить информацию, основанную на представительных знаниях системных операторов.

Ключевая задача систем ИИ в энергетике заключается в том, чтобы предотвратить предоставление пользователями неверных объяснений в рамках ХАИ и обеспечить надежные рекомендации. Хотя объяснения могут усилить доверие пользователей к системе, в долгосрочной перспективе результаты работы моделей не всегда оказываются

точными. Это может привести к тому, что пользователи начнут доверять ошибочным выводам, создавая ложную убежденность. Кроме того, доверие к неверным объяснениям или прогнозам заставляет их использовать неэффективные или небезопасные модели, что в будущем может привести к серьезным проблемам. Чтобы обеспечить доверие к локально объяснимому алгоритму, необходимо проверить его на различных входных данных. При этом подход, основанный на глобально объяснимом алгоритме, позволяет получить объяснения, используя весь набор данных [12]. Сравнение этих внутренних и временных, локальных и глобальных подходов к энергетическим приложениям требует дальнейшего изучения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ozcanli A.K., Yaprakdal F., Baysal M. Deep Learning Methods and Applications for Electrical Power Systems: A Comprehensive Review // *International Journal of Energy Research*. 2020. No. 44 (9), pp. 7136–7157.
2. Массель Л.В. Современный этап развития искусственного интеллекта (ИИ) и применение методов и систем ИИ в энергетике // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2021. № 4 (24). С. 5–18.
3. Machlev R., Perl M., Belikov J., Levy K., Levron Y. Measuring Explainability and Trustworthiness of Power Quality Disturbances Classifiers Using XAI – Explainable Artificial Intelligence // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021, pp. 5127–5137.
4. Adadi A., Berrada M. Peeking Inside the Black-box: A Survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI) // *IEEE Access*. 2018. No. 6, pp. 52138–52160.
5. Корнеев К.Б., Павлова Ю.М., Осеи-Овусу Р. Алгоритмические модели управления электрической нагрузкой в системах электроснабжения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 3 (15). С. 40–50.
6. Kruse J., Schäfer B., Witthaut D. Revealing Drivers and Risks for Power Grid Frequency Stability with Explainable AI // *Patterns*. 2021. No. 2 (11), pp. 1–26.
7. Любарский Ю.Я. Оперативный диспетчерский анализ нештатных ситуаций в электрических сетях промышленных предприятий – компьютерная поддержка на основе технологии экспертных систем // *Промышленная энергетика*. 2017. № 9. С. 2–6.
8. Donti P.L., Kolter J.Z. Machine Learning for Sustainable Energy Systems // *Annual Review of Environment and Resources*. 2021. No. 46 (1), pp. 719–747.
9. Ковалев С.П. Проектирование информационного обеспечения цифровых двойников энергетических систем // *Системы и средства информатики*. № 1. 2020. Т. 30. С. 66–81.
10. Корнеев К.Б., Окунева В.В., Павлова Ю.М. Открытость и защищенность протоколов передачи критической информации на объектах энергетики // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2019. № 2 (2). С. 50–57.
11. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. 2-е изд. М.: И.Д. Вильямс, 2016. 1408 с.
12. Бушуев В.В. Интеллектуальное (когнитивное) прогнозирование и управление в энергетике // *Системные исследования в энергетике: методология и результаты* / под ред. А.А. Макарова, Н.И. Воропая. М.: МЭИ, 2018. С. 102–112.



**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

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

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

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

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.

**EXPLAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS FOR POWER AND ELECTRICITY SYSTEMS: REVIEW, CHALLENGES AND POSSIBILITIES**

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

**Abstract.** The paper considers the prospects of using explainable artificial intelligence (XAI) methods in the field of electric power industry related to increasing the explainability of machine learning models and improving the understanding of their results. Common problems and limitations caused by the introduction of XAI methods in the field of power engineering and electric power systems are presented.

**Keywords:** electric power industry, power system, neural networks, deep learning, explainable artificial intelligence, XAI.

**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

*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., Torgovanova O.N., Korneev K.B. Explainable artificial intelligence methods for power and electricity systems: review, challenges and possibilities // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 50–57.

УДК 669.187:621.186

**ЗАКОНЫ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ  
ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ,  
ФАКЕЛЬНЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ, ТОПОК ПАРОВЫХ КОТЛОВ,  
КАМЕР СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК***А.Н. Макаров**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., 2024

**Аннотация.** Изложены результаты анализа источников тепла, поступающего в высокоомощную дуговую сталеплавильную печь (ДСП). Указано, что электрические дуги являются основными источниками тепла в ДСП; теплообмен ионизированных газовых объемов дуг и неионизированных газовых объемов факелов газокислородных горелок с поверхностями нагрева в ДСП осуществляется тепловым излучением. Доказано наличие значительной погрешности при расчете теплообмена газовых объемов дуг, факелов с поверхностями нагрева по закону теплового излучения твердых тел, т.е. по закону Стефана – Больцмана. Рассмотрены открытые в России в 1996–2001 годах законы квантового теплового излучения газовых объемов электрических дуг и факелов ДСП, факелов, факельных нагревательных печей (ФНП), топков паровых котлов (ТПК) тепловых электрических станций, камер сгорания (КС) газотурбинных установок (ГТУ) электростанций. Отмечено, что, согласно открытым законам, в газовые объемы дуг, факелов вписываются цилиндрические газовые объемы и в расчетах их тепловое излучение с высокой точностью моделируется тепловым излучением цилиндрических осей симметрии. На основе открытых законов разработана методика расчета теплообмена в ДСП, ФНП, ТПК, КС ГТУ.

**Ключевые слова:** электрическая дуга, факел, теплообмен излучением, газовые объемы, законы теплового излучения, печи, топки, камеры сгорания.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-58-67****ВВЕДЕНИЕ**

Электрические дуги являются основными источниками тепла в дуговых сталеплавильных печах (ДСП). Согласно результатам анализа энергетических балансов, на долю дуг в современных высокоомощных ДСП приходится 55–65 % тепла, поступающего в печь. Доли тепла, выносимого в ДСП другими источниками, распределяются следующим образом: тепло реакций окисления металла – 12–20 %; тепло факелов (газовых объемов) газокислородных горелок (ГКГ) – 7–14 %; тепло инжекторов угольного порошка – 12–18 % [1; 2]. Среди внешних источников энергии (дуг, факелов ГКГ, инжекторов) электрические дуги являются наиболее эффективными источниками тепловой энергии в ДСП. Коэффициент полезного использования тепла дуг (КПД дуг) за одну плавку в современных высокоомощных ДСП в среднем составляет 0,76–0,78, коэффициент полезного использования тепла газовых объемов факелов ГКГ не превышает 0,55, а

коэффициент полезного использования тепла газовых объемов инжекторов угольного порошка составляет 0,28–0,36 [2]. Коэффициент полезного использования тепла газовых объемов факелов ГКГ максимален в начале расплавления шихты при горении факела в нише в шихте. Он снижается до значения 0,25–0,3 при горении факела ГКГ на жидкометаллическую ванну. Коэффициент полезного использования тепла внутреннего источника тепловой энергии реакции окисления металлов составляет 1,0. Это тепло полностью усваивается ванной [2], но окислять, сжигать металл в ДСП экономически нецелесообразно.

Вся электрическая мощность, подведенная к дуге, преобразуется в ней в тепловой поток. Теплообмен электрических дуг с поверхностями нагрева в ДСП осуществляется за счет теплового излучения [3]. Тепловые потоки, падающие на поверхности стен, свода, ванны, на 95 % состоят из потоков тепловых излучений [2; 3]. В высокомошных ДСП 92–94 % мощности дуги выделяется в столбе дуги, представляющем собой ионизированный газовый объем, и излучается им в виде теплового потока во всех направлениях в рабочем пространстве ДСП. Столб дуги в ДСП – это ионизированный газовый объем в форме усеченного конуса. В связи с равномерным распределением мощности по высоте столба в расчетах теплообмена он моделируется цилиндрическим ионизированным газовым объемом [2]. Незначительная часть мощности (2–3 % мощности дуги) передается ионизированным газом на основе конвекции ванне металла. Часть мощности (5–8 % мощности дуги) выделяется в анодно-катодных пятнах на электроде и в ванне металла и передается теплопроводностью в равных долях объемам графитового электрода и ванны металла.

При факельном сжигании топлива в ГКГ ДСП, в факельных нагревательных печах (ФНП) в металлургии и машиностроении, в топках паровых котлов (ТПК), камерах сгорания (КС) газотурбинных установок (ГТУ) тепловых электрических станций (ТЭС) тепловые потоки, падающие от газового объема факела на поверхности нагрева, на 95–97 % состоят из потоков теплового излучения [4–7]. Процессы преобразования электрической энергии в газовом объеме электрической дуги, горящей в ДСП, и энергии топлива при его факельном сжигании в ГКГ в ТПК ТЭС, КС ГТУ ТЭС идентичны: электрическая энергия в электрической дуге ДСП и энергия топлива при его факельном сжигании преобразуются в поток теплового излучения [8]. На протяжении XX века, до открытия в России законов теплового излучения ионизированных (электрическая дуга в ДСП) и неионизированных (факел ГКГ в печах, топках, КС) газовых объемов, расчет теплообмена в печах, топках, КС осуществляли по закону теплового излучения твердых тел Стефана – Больцмана [4–8]. На основе данного закона были разработаны методы расчета Чандрасекара, Шварцильда – Шустера, зональный, численный и другие, однако они не получили широкого распространения, так как излучение газовых объемов не подчиняется закону теплового излучения твердых тел и погрешность расчетов составляет 200–300 % и более [8]. Плотность потока теплового излучения твердого тела, топлива на нагреваемое твердое тело, согласно закону Стефана – Больцмана, определяется по формуле [4–7]

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

где  $c_s$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела (АЧТ);  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент излучения;  $T_1, T_2$  – температура горящего твердого топлива на колосниковых

решетках и поверхности нагрева соответственно,  $K$ ;  $\varphi_{12}$  – угловой коэффициент, т.е. доля излучения слоя топлива на поверхность нагрева.

### **ПОГРЕШНОСТЬ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА В ДСП, ФНП, ТПК, КС ГТУ**

Закон Стефана – Больцмана используется для определения плотностей потоков тепловых излучений твердого топлива (угля, торфа, сланцев) (рис. 1), находящегося на колосниковых решетках, на экранные поверхности труб в ТПК электростанций. В этом случае названный закон дает безукоризненный результат расчета [4].



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

Использование закона Стефана – Больцмана для расчета плотностей потоков теплового излучения газовых объемов электрических дуг, факелов ГКГ в ДСП, факелов в нагревательных печах, ТПК, КС ГТУ в энергетике приводит к значительным погрешностям. Например, в ФНП для нагрева слитков перед прокаткой мощность газового объема факела 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 [9]. Средняя плотность теплового потока излучения газового объема факела на расчетную площадку на слитках, рассчитанная по формуле (1), равняется 40 кВт/м<sup>2</sup>. При подогреве подаваемого в ГКГ воздуха до 600 °С среднемассовая температура газового объема факела возросла до 2 000 °С, а мощность факела – 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/м<sup>2</sup>, т.е. в 5 раз, а 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 [9]. Погрешность в расчетах теплового излучения газового объема факела на поверхность слитков составила, согласно закону теплового излучения твердых тел, 427 %.

Применение закона теплового излучения твердых тел (формулы (1)) для расчета плотности потока теплового излучения газового ионизированного объема дуги на

расчетные площадки в ДСП также неприемлемо. Среднемассовая температура дуги в ДСП всего номенклатурного ряда от 0,5 до 200 т в жидкие периоды плавки составляет 6 000 °С [10–12]. При расчетах по формуле (1) получаем одинаковую плотность потока теплового излучения дуги на поверхности нагрева в ДСП-1,5 и ДСП-150 (1,5 и 150 т), одинаковую производительность печей при мощности дуг в этих печах 0,4 МВт и 80 МВт соответственно. В реальности производительность 1,5-тонной ДСП составляет 0,5 т/ч, а 150-тонной – около 200 т/ч, т.е. производительность ДСП зависит от мощности дуг, а не от температуры дуг в четвертой степени, закон теплового излучения твердых тел (1) неприемлем для расчета теплообмена газовых ионизированных и неионизированных объемов с поверхностями нагрева.

### **ЗАКОНЫ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ**

В 1996–2001 годы в России были открыты законы теплового излучения ионизированных (электрические дуги в ДСП) и неионизированных (факелы в ДСП, нагревательных печах, ТПК, КС ГТУ) газовых объемов [13]. Первый закон теплового излучения ионизированных и неионизированных газовых объемов любой формы (рис. 2) и любых габаритов вывели на основе математических расчетов [8; 13]. Он имеет следующий вид:

$$q_{GF} = \frac{\varphi_{GF} P_G}{F e^{kl}}, \quad (2)$$

где  $q_{GF}$  – плотность потока теплового излучения газового объема на расчетную площадку  $F$ , кВт/м<sup>2</sup>;  $\varphi_{GF}$  – угловой коэффициент, т.е. доля излучения газового объема на расчетную площадку;  $P_G$  – мощность газового объема, кВт;  $F$  – площадь расчетной площадки, м<sup>2</sup>;  $e$  – число натуральных логарифмов;  $k$  – коэффициент поглощения газового объема;  $l$  – средняя длина пути лучей квантов от всех атомов газового объема до расчетной площадки, м.



Рис. 2. Горение газообразного, жидкого, пылевидного топлива с образованием газового объема в ТПК [14]

Определение доли излучения газового объема на расчетную площадку и установление средней длины пути лучей квантов от всех атомов газового объема до

площадки – это сверхсложные математические задачи. Для определения доли излучения и средней длины путей квантов от всех квинтиллионов ( $10^{30}$ ) атомов газового объема необходимо решить трехкратные интегральные уравнения по длине, ширине, высоте газового объема. В XX веке решения данных уравнений по объему газового объема не было найдено ни в России, ни в других странах. Задачи расчета доли излучения газового объема на площадку и средней длины пути квантов от всех атомов до расчетной площадки были решены автором настоящей работы после открытия законов теплового излучения цилиндрических газовых объемов [8; 13]. Цилиндрические газовые объемы вписываются в газовые объемы электрических дуг, факелов ГКГ ДСП, ФНП, ТПК, КС ГТУ ТЭС.

Второй закон теплового излучения газовых объемов имеет следующую формулировку и аналитическую запись: «Угловые коэффициенты, т.е. доля излучения на расчетную площадку, цилиндрического газового объема  $\varphi_{GF}$  и его цилиндрической оси симметрии  $\varphi_{OF}$  равны при равенстве количества атомов и мощностей в цилиндрическом объеме и его цилиндрической оси симметрии»:

$$\varphi_{GF} = \varphi_{OF}. \quad (3)$$

Уникальное явление, описанное вторым законом теплового излучения газовых объемов, происходит в том случае, когда все атомы большого цилиндрического газового объема радиальным усилием сжаты на цилиндрическую ось объема. В этом случае мощности теплового излучения цилиндрического газового объема и его цилиндрической оси симметрии равны. Второй закон теплового излучения газовых объемов позволил осуществить переход от нерешенных тройных интегралов по длине, ширине, высоте газового объема (при определении доли излучения газового объема на расчетную площадку и средней длины пути квантов от всех атомов объема до площадки) к однократным интегралам по высоте оси симметрии газового объема с геометрическими и тригонометрическими функциями в подынтегральных выражениях, связывающих площадку и все атомы газового объема. Однократные интегралы для расчета доли излучения цилиндрического газового объема электрической дуги, факела ГКГ ДСП, ФНП, ТПК, КС ГТУ на расчетную площадку решены автором для любого положения цилиндрической оси симметрии газового объема дуги, факела и расчетной площадки [8].

С открытием третьего закона теплового излучения газовых объемов было найдено простое решение сверхсложной задачи определения средней длины пути квантов от всех квинтиллионов атомов газового объема до расчетной площадки: «Средняя длина пути квантов от всех квинтиллионов атомов цилиндрического газового объема до расчетной площадки  $l_{GF}$  равна среднеарифметическому расстоянию от оси симметрии цилиндрического газового объема  $l_{OF}$  до расчетной площадки»:

$$l_{GF} = l_{OF}. \quad (4)$$

Третий закон теплового излучения газовых объемов дал возможность решить в России сверхсложную задачу (которая не была решена в других странах мира) определения средней длины пути квантов от атомов (которых, например, в ТПК энергоблока 800 МВт столько, сколько песчинок в пустыне Сахара) до расчетной площадки. После открытия третьего закона теплового излучения газовых объемов решение задачи оказалось простым (в несколько алгебраических действий) [8].

Четвертый закон теплового излучения газовых объемов является следствием второго и третьего законов: «Плотности потоков тепловых излучений на расчетную

площадку цилиндрического газового объема  $q_{ГФ}$  и газового объема его цилиндрической оси симметрии  $q_{ОФ}$  равны при равенстве в этих газовых объемах количества излучающих атомов и мощностей тепловых излучений»:

$$q_{ГФ} = q_{ОФ}. \quad (5)$$

Открытие законов теплового излучения газовых объемов позволило выявить уникальное физическое явление: в газовые объемы электрических дуг, факелов ГКГ, факелов любых размеров ФНП, ТПК, КС можно вписывать цилиндрические газовые объемы и моделировать, рассчитывать с высокой точностью тепловое излучение газового объема на основе теплового излучения его цилиндрической оси симметрии на любую расчетную площадку.

### ***МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ***

В электрическую дугу ДСП вписывается один цилиндрический газовый объем. В газовые объемы факелов ГКГ ДСП, факелов ФНП, ТПК, КС (в зависимости от распределения изотерм по объему факела) вписываются несколько цилиндрических газовых объемов или несколько десятков цилиндрических газовых объемов, от каждого из которых по формуле (1) определяются плотности потоков излучений цилиндрических газовых объемов и суммарная плотность потока теплового излучения газового объема факела. В книге [8] приведены экспериментальные подтверждения открытых законов. Измерения тепловых потоков на действующих ДСП свидетельствуют о том, что погрешность при математическом моделировании теплового излучения газовых объемов электрических дуг, факелов ГКГ в ДСП, факелов в ФНП, ТПК, КС тепловым излучением вписанных в них цилиндрических газовых объемов, их цилиндрической осью симметрии не превышает 6–8 %.

Открытые законы теплового излучения газовых объемов, как и законы теплового излучения твердых тел Стефана – Больцмана, относятся к фундаментальным законам физики, обладают мультидисциплинарностью и используются в металлургии, энергетике, различных отраслях машиностроения [8; 13]. Разработанная на основе научного открытия методика позволяет рассчитать теплообмен газового объема факела ГКГ и поверхностей нагрева ДСП при их любом пространственном положении. Расчеты распределения плотностей потоков тепловых излучений газового объема факела ГКГ по поверхности ванны, согласно открытым законам и разработанной методике расчета, показывают, что чем меньше угол между осью симметрии газового объема факела ГКГ и поверхностью ванны, тем больше плотность теплового потока излучения газового объема факела на поверхность ванны [8; 13].

Открытие фундаментальных законов физики – редкое событие в истории человечества, которое происходит один раз в 80–100 лет. Подтверждением данного факта являются учебники физики [15], в которых изложены около 30 фундаментальных законов физики, открытые за последние 2 500 лет истории человечества. После учреждения Нобелевской премии в 1900 г. ученые, открывшие фундаментальные законы физики, были ее удостоены: В. Вин – за открытие законов теплового излучения твердых тел (1911 г.), М. Планк – за открытие кванта излучения (1918 г.), Н. Бор – за заслуги в изучении строения атома и излучения из него (1922 г.). Нобелевской премии были бы удостоены и Стефан с Больцманом за открытие закона теплового излучения твердого тела, но она была

учреждена уже после их смерти. С 1922 г. и до настоящего времени Нобелевская премия присуждалась за открытия явлений природы (например, нейтрона, позитрона, космических лучей и т.д.), великие изобретения (к примеру, интегральные схемы, оптические системы передачи данных, светодиоды), но ни разу не присуждалась за открытие фундаментальных законов физики, поскольку после 1922 г. не было совершено открытий такого уровня [15].

На основе законов теплового излучения газовых объемов была разработана методика расчета теплообмена в ДСП, позволяющая определить тепловые потоки излучения, падающие от дуг с различными геометрическими и электрическими параметрами на поверхности стен, свода, ванны, рассчитать коэффициент полезного использования тепла дуг  $\eta_d$  (КПД дуг) при различных электротехнологических режимах, высоте слоя шлака, диаметре распада электродов, расстоянии от дуг до стен, прогнозировать удельный расход электроэнергии при заглублении дуг в шлак различной высоты и определять другие энергетические параметры плавок [8; 13]. Открытые законы теплового излучения газовых объемов позволили установить, что при полном заглублении дуг в шлак тепловые потоки их излучения преобразуются в углублениях в ванне, шлаке в потоки конвективные при турбулентном перемещении дугами шлака и металла из углубления на поверхность ванны, а также в потоки теплопроводности, нагревающие весь объем ванны и шлак [13]. Остаются неизученными процессы теплопередачи дуг в углублениях в ванне металла и шлаке и процессы передачи тепла из углублений под дугами на периферийные участки ванны, на периферийные участки шлака и металла, отсутствуют данные о распределении изотерм по поверхности шлака и металла в окислительный период перед выпуском металла в печь-ковш.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На основе научного открытия автором была разработана теория теплообмена в ДСП, ФНП, ТПК, КС ГТУ. Она представлена в учебном пособии [13] и монографии [8]. Пособие рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением по образованию в области металлургии для использования в университетах. Как и открытые законы, учебник мультидисциплинарен и применяется при обучении студентов, магистрантов, аспирантов по направлениям «Металлургия», «Теплоэнергетика и теплотехника», «Электроэнергетика и электротехника» «Энергетическое машиностроение», «Техническая физика», «Технологические машины и оборудование» в ведущих университетах России: МИСИС; МЭИ; МГТУ им. Н.Э. Баумана; Московском политехническом университете; Уфимском авиационном техническом университете; Южно-Уральском государственном университете; Казанском (Приволжском) федеральном университете; Казанском национальном исследовательском техническом университете; Уральском федеральном университете; Томском политехническом университете; Сибирском университете науки и технологий; Пермском национальном исследовательском политехническом университете; Санкт-Петербургском горном университете; Магнитогорском техническом университете; Российском профессионально-педагогическом университете; Алтайском техническом университете; Казахском агротехническом университете, а также в других университетах России и ближнего зарубежья. В подтверждение сказанного можно набрать в поисковой системе интернета: «Макаров, теплообмен в рабочих программах», после чего найти рабочие программы дисциплин в университетах, где используется данное учебное пособие.

Открытые законы квантового теплового излучения газовых объемов факелов и разработанная на их основе методика расчета теплообмена используются в практической



деятельности в металлургических, энергетических, промышленных компаниях для расчета рациональных конструкций ДСП, ФНП, ТПК, КС ГТУ, повышения коэффициента полезного использования тепла топлива и электрической дуги, снижения расхода топлива и электрической энергии, увеличения надежности и срока службы экранных труб, горелок, жаровых турбин и других конструкций печей, топок, КС, сокращения выбросов загрязняющих веществ в регионах.

В РСФСР в конце 1980-х годов, например, удельное потребление электроэнергии в электродуговой ДСП (ЭДСП) вместимостью 100 т стали составляло 450–460 кВт · ч/т. К 2015 году за счет технологических факторов, рациональной организации теплообмена в ДСП удельное потребление электроэнергии снизилось до 350–360 кВт · ч/т. Экономия электроэнергии составляет 100 млн кВт · ч на одну печь в год. В этом есть заслуга сотрудников металлургических компаний, а также профессорско-преподавательского состава кафедр металлургии, которые их готовят. Кроме того, определенная заслуга принадлежит и А.Н. Макарову – разработчику пионерской теории теплообмена в ЭДСП. Данная теория используется для подготовки специалистов в университетах и для расчета рационального теплообмена в ЭДСП в металлургических компаниях.

Подробно информация о выводе законов квантового теплового излучения газовых объемов факелов и их мультидисциплинарном использовании в различных отраслях промышленности, энергетике, металлургии и сфере образования изложена в статьях журналов [17–27], включенных в мировые базы данных Web of Science и Scopus, а также в видеозаписях, которые можно посмотреть, если набрать в поисковой системе: «ВКонтакте, ТвГТУ, видео, лекции профессора А.Н. Макарова».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности тепловой работы электропечи ДСП-120 Consteel на Ашинском металлургическом заводе / В.Г. Евстратов [и др.] // *Электротехника*. 2012. № 8. С. 2–6.
2. Дорофеев Г.А., Зинягин Т.А., Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 324 с.
3. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
4. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
5. Расчет нагревательных и термических печей: справочник / под ред. В.М. Тымчака, В.Л. Гусовского. М.: Металлургия, 1983. 480 с.
6. Зигель Р., Хауэлл Д. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с.
7. Сперроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. Л.: Энергия, 1971. 294 с.
8. 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.
9. Мاستрюков Б.С. Теплотехнические расчеты промышленных печей: учебник. М.: Металлургия, 1972. 368 с.
10. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1985. 280 с.
11. Огороков Н.А. Дуговые сталеплавильные печи. М.: Металлургия, 1971. 347 с.
12. Сисоян Г.А. Электрическая дуга в электрической печи. М.: Металлургия, 1971. 304 с.
13. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках: учебное пособие. СПб.: Лань, 2014. 384 с.

14. Сайт компании DURAG GROUP. URL: [www.durag.com](http://www.durag.com) (дата обращения: 23.09.2024).
15. Трофимова Т.И. Курс физики: учебник для студентов вузов. М.: Высшая школа, 2001. 369 с.
16. Дорофеев Г.А., Ашпин Н.А., Степанов Я.М., Зинягин Г.А., Макаров А.Н. Металлургия железа – от огня Прометея к термической плазме: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2024. 324 с.
17. Makarov A.N. Calculation of Heat Radiation from Gas Volume of the Torch. Part II. Calculations of Radiation from the on Burner // *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. No. 16 (1), pp. 43–52.
18. Makarov A.N. Calculation of Heat Transfer in Torch Furnaces // *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. No. 18(1), pp. 1–20.
19. Makarov A.N. Calculation of Heat Transfer in Furnaces of Steam Boilers under Laws of Radiation of Gas Volume // *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. No. 18 (2), pp. 423–436.
20. Makarov A.N. Radiation from Large Gas Volumes and Heat Exchange in Steam Boiler Furnaces // *Power Technology and Engineering*. 2015. No. 3 (49), pp. 196–201.
21. Makarov A.N. Flare Temperature and Nitrogen Oxide Emission Reduction and Heat Transfer in the TGMP-314I Steam Boiler Firebox // *Power Technology and Engineering*. 2016. No. 2 (50), pp. 200–203.
22. Makarov A.N., Okuneva V.V., Galicheva M.K. Influence of the Length of a Torch Tongue on Heat Flow in a Burner Device // *Power Technology and Engineering*. 2017. No. 4 (51), pp. 445–450.
23. Makarov A.N. Calculation and Analysis of the Relationship between the Efficiency and Position of Electric Arcs and Power Consumption in Electric Arc Furnaces (EAF) of Smaller and Larger Capacity. Part I. Calculation and Analysis of the Relationship between Arc Efficiency and Power Consumption // *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. No. 3–4, pp. 341–349.
24. Makarov A.N. Calculation and Analysis of the Relationship between the Efficiency and Position of Electric Arcs and Power Consumption in Electric Arc Furnaces (EAF) of Smaller and Larger Capacity. Part 2. Calculation and Analysis of the Relationship between Position Arcs, Walls and Power Consumption // *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. No. 5–6, pp. 441–450.
25. Makarov A.N. Effect of the Sloganeer Thickness, Gas Composition, and Furnace Capacity on the Arc Efficiency and Heat Transfer in Arc Furnaces. Part I. Effect of the Slag Thickness and Furnace Capacity on Arc Efficiency // *Metallurgist*. 2021. Vol. 64. No. 9–10, pp. 987–996.
26. Makarov A.N. Effect of the Sloganeer Thickness, Gas Composition, and Furnace Capacity on the Arc Efficiency and Heat Transfer in Arc Furnaces. Part II. Effect of the Slag Thickness on the Magnitude of Arc Heat Radiation Incident to the Walls // *Metallurgist*. 2021. Vol. 64. No. (11-12), pp. 1121–1129.
27. Makarov A.N. Complex Heat Transfer in a Bath under Arcs of High-power Arc Steel-melting Furnaces. Part I. Laws of Thermal Radiation of Gas Volumes and their Rationale for Calculating Heat Transfer in EAFs // *Metallurgist*. 2024. Vol. 67. No. 9–10, pp. 1438–1447.

#### 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: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.ru](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.ru)

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Макаров А.Н. Законы теплового излучения газовых объемов электродуговых сталеплавильных печей, факельных нагревательных печей, топок паровых котлов, камер сгорания газотурбинных установок // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 4 (24). С. 58–67.

---

**LAWS OF THERMAL RADIATION OF GASEOUS VOLUMES  
OF ELECTRIC ARC STEEL-MELTING FURNACES, FLARE HEATING FURNACES,  
STEAM BOILER FURNACES, COMBUSTION CHAMBERS  
OF GAS TURBINE PLANTS**

*A.N. Makarov*

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The results of the analysis of heat sources entering a high-power arc steelmaking furnace (ASF) are presented. It is stated that electric arcs are the main sources of heat in ASF; heat exchange of ionized gas volumes of arcs and non-ionized gas volumes of flares of gas-oxygen burners with heating surfaces in ASF is carried out by thermal radiation. It is proved that there is a significant error in calculating the heat exchange of gas volumes of arcs and flares with heating surfaces according to the law of thermal radiation of solid bodies, i.e. according to the Stefan – Boltzmann law. The laws of quantum thermal radiation of gas volumes of electric arcs and flares, flares, flare heating furnaces (FHF), steam boiler furnaces (SBF) of thermal power plants, combustion chambers (CC) of gas turbine units (GTU) of power plants discovered in Russia in 1996–2001 are considered. It is noted that, according to the open laws, cylindrical gas volumes of arcs, flares are inscribed in the gas volumes of arcs, flares and in calculations their thermal radiation is modeled with high accuracy by thermal radiation of cylindrical symmetry axes. On the basis of the open laws the methodology of heat exchange calculation in ASF, FHF, SBF, CC of GTU is developed.

**Keywords:** electric arc, torch, heat exchange by radiation, gas volumes, laws of thermal radiation, furnaces, fireboxes, combustion chamber.

**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: [gtu\\_kafedra\\_ese@mail.ru](mailto:gtu_kafedra_ese@mail.ru)

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Makarov A.N. Laws of thermal radiation of gaseous volumes of electric arc steel-melting furnaces, flare heating furnaces, steam boiler furnaces, combustion chambers of gas turbine plants // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 58–67.

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 532.135: 666.97

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДООБРАЗНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, С ПОМОЩЬЮ КОНУСНОЙ ПЕНЕТРАЦИИ. ЧАСТЬ 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

© Белов В.В., 2024

**Аннотация.** В статье представлено описание того, как с помощью пенетрационного вискозиметра и специально разработанной методики были измерены предельное напряжение сдвига и вязкость в уплотненных твердообразных трехфазных дисперсных системах: увлажненного молотом песке различной дисперсности, смеси молотого и Вольского песка естественной дисперсности и цементно-песчаных смесях. Отмечено, что полученные зависимости реологических характеристик от влажности, удельной поверхности и пористости показывают непосредственную связь реологических свойств трехфазных дисперсных систем с капиллярным сцеплением. Это позволяет эффективно воздействовать на величину капиллярного сцепления и связанные с ним реологические свойства дисперсных систем, применяемых для производства строительных материалов.

**Ключевые слова:** структурированные дисперсные системы, предельное напряжение сдвига и вязкость, метод конусной пенетрации, конусный реометр.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-68-74**

В частях 1 и 2 настоящей работы [1; 2] на основе изучения картины течения твердообразной дисперсной среды вокруг погруженного в нее конуса было показано, что для определения реологических характеристик таких систем целесообразно использовать метод конусной пенетрации.

Сырьевые смеси, применяемые в производстве многих строительных материалов, представляют собой структурированные дисперсные системы, которые относятся к классу упруговязкопластичных материалов. Знание реологических характеристик сырьевых смесей необходимо для практики, так как оптимальные показатели данных характеристик требуются для успешной работы технологического и транспортирующего оборудования, восприятия температурных напряжений в процессе тепловой обработки и т.п. При этом как технологические, так и эксплуатационные параметры определяются состоянием структуры изучаемого материала [3].

Использование рассмотренной в работах [1; 2] методики расчета пластично-вязких характеристик делает из пластометра конусный реометр, с помощью которого, а также

указанной выше методики можно определять реологические характеристики малопластичных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов (мелкозернистых жестких бетонных и растворных смесей, а также свежесформованных изделий (сырца), полученных методами полусухого прессования, вибропрессования); в производстве силикатного и керамического кирпича; прессованных и вибропрессованных бетонных изделий; сырца ячеистобетонных изделий и т.п. Эти трехфазные по агрегатному состоянию («твердое» – «жидкость» – «газ») системы с реологической точки зрения также являются твердообразными, в которых периоды восстановления разрушенных связей сокращаются.

В работе [4] установлен экстремальный характер зависимостей когезии цементных паст и бетонных смесей, определенной методом прямого сдвига, от водоцементного отношения (В/Ц). Как оказалось, максимум когезии для бетонных смесей ниже, чем для цементных паст, зависит от формы зерен заполнителя в случае непрерывной гранулометрии и не зависит от нее в случае прерывистой. Максимальные значения для когезии наблюдались при критических значениях В/Ц, когда цементная паста во время вибрации изменяет характер своего поведения, т.е. переходит от уплотнения, подобного сыпучим массам, к уплотнению с тиксотропным разрушением (разжижением) структуры [5]. Для таких высококонцентрированных трехфазных дисперсных систем, как влажные пресс-порошки, с ростом структурной прочности периоды восстановления разрушенных связей сокращаются. Поэтому тиксотропия в данных системах участвует в процессе течения скрыто, реализуясь лишь при поддержании состояния разрушения внутренних связей [6].

Ранее нами было показано [7], что прочность на разрыв трехфазных дисперсных систем определяется силами капиллярного сцепления, составляющими более 98 % от суммарной величины всех сил межчастичного взаимодействия. Максимальное капиллярное сцепление для данной системы (разрывная прочность) зависит от степени ее уплотнения, увеличиваясь с ростом последней, но достигается при одной и той же влажности. Аналогичный характер зависимости капиллярного сцепления от влажности (водотвердого отношения) в дисперсных системах и одной из реологических характеристик (когезии при сдвиге) таких дисперсных систем, как бетонные и растворные смеси, позволяет высказать обоснованное предположение о непосредственной связи реологических свойств трехфазных систем с капиллярным сцеплением. Цель настоящей работы заключалась в установлении указанной взаимосвязи и обосновании возможности направленного регулирования реологических свойств сырьевых смесей для производства строительных материалов.

Пробы исследуемых сред готовили в цилиндрической форме с внутренним диаметром 90 мм и высотой 40 мм. Пробы песка и сырьевых смесей уплотнялись на гидравлическом прессе в указанной форме со съемной насадкой до одного и того же объема, равного объему основной формы. Навеска песка или смеси рассчитывалась из условия получения заданной пористости или средней плотности в пересчете на сухое вещество. В некоторых экспериментах уплотнение проб производилось при заданном давлении прессования. В этих случаях навеска подбиралась из того расчета, чтобы при минимальном давлении прессования поверхность уплотненной пробы была примерно (чуть ниже) на одном уровне с краями формы. Содержание воды затворения изменялось от нуля до величины, соответствующей полному заполнению пор системы, т.е. достижению системой двухфазного состояния. Для количественной характеристики влажностного

состояния использовалась как величина влажности (водотвердого отношения), так и общепринятая при оценке указанного состояния растворных смесей величина водо-вязущего (для цементно-песчаных смесей – В/Ц) отношения.

При повышении влажности предельное напряжение сдвига и вязкость уплотненного до постоянной пористости молотого песка с удельными поверхностями 103, 196, 298 и 384 м<sup>2</sup>/кг сначала растут, достигают максимума при определенной влажности, а затем уменьшаются (рис. 1, 2). Такой же характер носит и изменение капиллярного сцепления в этой системе в зависимости от влажности [7], причем, как оказалось, значения влажности  $W_{MC}$ , соответствующие максимумам разрывной прочности (капиллярного сцепления) и предельного напряжения сдвига для молотого песка с одинаковой удельной поверхностью, совпадают (независимо от пористости системы). Следовательно, предельное напряжение сдвига трехфазных дисперсных систем определяется в основном капиллярным сцеплением и отражает его действие. Зависимости вязкости уплотненного молотого песка от влажности имеют аналогичный характер. Вместе с тем, поскольку величина пластической вязкости зависит не только от сил сцепления, но и от коэффициента внутреннего трения, который с увеличением влажности системы монотонно уменьшается, максимум вязкости дисперсных систем наблюдается при влажности, меньшей влажности  $W_{MC}$ .

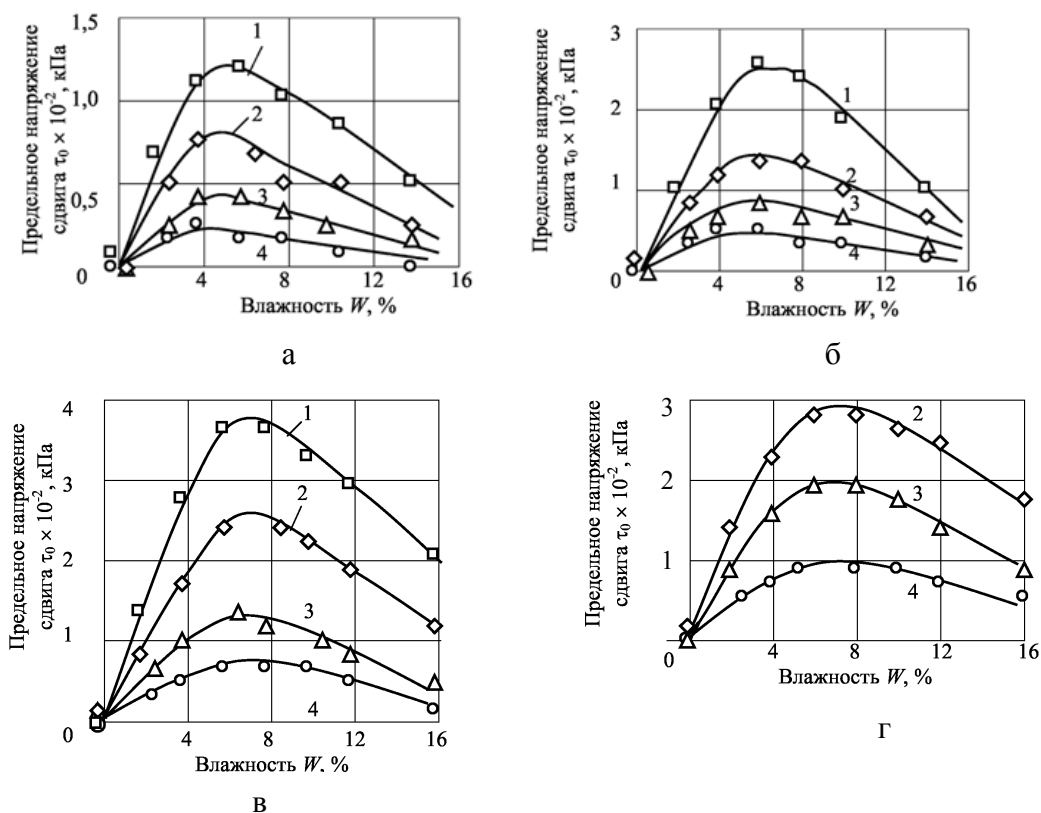


Рис. 1. Предельное напряжение сдвига уплотненного молотого песка с удельной поверхностью, м<sup>2</sup>/кг: а – 103; б – 196; в – 298; г – 384 в зависимости от влажности; 1 – пористость образцов 42 %; 2 – 46 %; 3 – 50 %; 4 – 54 %

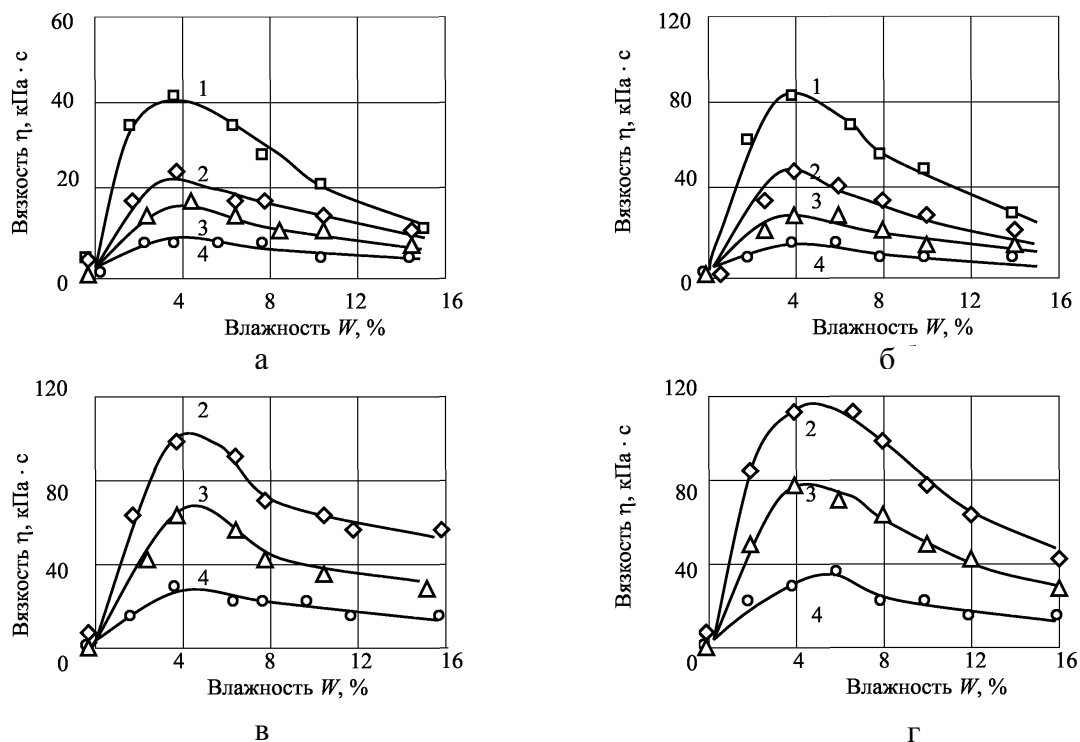


Рис. 2. Вязкость уплотненного молотого песка с удельной поверхностью,  $\text{м}^2/\text{кг}$ : а – 103; б – 196; в – 298; г – 384 в зависимости от влажности; 1 – пористость образцов 42 %; 2 – 46 %; 3 – 50 %; 4 – 54 %

На графиках зависимостей вязкости от влажности (см. рис. 2) хорошо заметно скачкообразное падение значений этого параметра при превышении влажности  $W_{\text{мс}}$ . Таким образом, можно ожидать, что именно влажность  $W_{\text{мс}}$  для данных систем будет характеризовать отмеченный ранее [6] переход их состояния от влажных пресс-порошков к концентрированным пастам, и этот переход реализуется с потерей свойства зернистых сред, а именно сыпучести, и приобретением основного свойства, определяющего реологию, – связности. При этом, как указано в работе [6], высококонцентрированные дисперсии обладают высокой чувствительностью к балансу добавочной жидкости, при которой форсируется переход системы в другой структурно-механический тип. Данный переход и характеризуется скачкообразным падением вязкости при превышении влажности  $W_{\text{мс}}$ .

Трансформацию фрагмента ячеистой структуры трехфазной дисперсной системы при сдвиговой деформации можно представить на модели (рис. 3).

При сдвиговой деформации в трехфазной структурированной дисперсной системе под действием сил капиллярного сцепления происходят скачкообразный разрыв связи между частицами и такое же восстановление связи, но уже с соседней частицей. Таким образом, частицы системы как бы передают эстафету связей друг другу. Этот эстафетный характер разрушения и восстановления структуры определяет малый период данных процессов и слабо выраженные тиксотропные свойства систем.

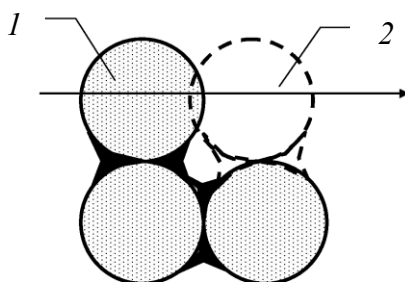


Рис. 3. Трансформация фрагмента ячеистой структуры трехфазной дисперсной системы при сдвиговой деформации: 1 – положение частицы до деформации; 2 – после деформации

Увеличение количества жидкости в зонах контакта частиц изменяет реологическое поведение системы. При этом формируется переходный тип системы, характеризующийся наличием трехфазных агрегатов-гранул, в которых воздух находится в защемленном состоянии, а связность гранул определяется внешними капиллярными силами. Модель трансформации фрагмента структуры такой системы при сдвиговой деформации (рис. 4) показывает, что в системе процесс деформирования происходит плавно, сглаживается и демпфируется окружающей жидкостью, причем разрушение и восстановление структуры будут носить менее выраженный характер на фоне сохраняющейся связности гранул. Поэтому данная система, представляющая собой в уплотненном состоянии концентрированную пасту, будет обладать ярко выраженными тиксотропными свойствами.

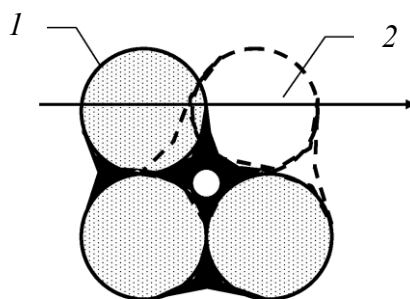


Рис. 4. Трансформация фрагмента структуры трехфазной гранулы при сдвиговой деформации: 1 – положение частицы до деформации; 2 – после деформации

Таким образом, предельное напряжение сдвига и вязкость твердообразных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов, могут определяться на пенетрационном реометре ПРБ-2 с использованием методики, которая разработана в настоящем исследовании на основе экспериментально полученной картины деформирования среды вокруг конуса.

Пенетрационный реометр ПРБ-2 и теория определения реологических характеристик, основанная на учете истинного характера деформирования среды вокруг конуса, являются базой для развития пенетрационной вискозиметрии твердообразных дисперсных



систем. Дальнейшее применение прибора ПРБ-2 и разработанной теории может выявить новые особенности как метода, так и реологических свойств различных материалов.

Предельное напряжение сдвига трехфазных дисперсных систем устанавливается в основном капиллярным сцеплением и отражает его действие. Величина пластической вязкости зависит не только от сил сцепления, но и от коэффициента внутреннего трения между частицами дисперсной системы. Влажность  $W_{mc}$ , соответствующая максимуму капиллярного сцепления и предельного напряжения сдвига в системе, характеризует переход ее состояния от влажного пресс-порошка к концентрированной пасте. Этот переход отличается скачкообразным падением вязкости. Указанная связь капиллярного сцепления и реологического поведения системы объясняется эстафетным характером разрушения и восстановления ее структуры в трехфазном состоянии (при наличии внутренних капиллярных сил) и последующим переходом этой структуры в другой структурно-механический тип, характеризующийся преимущественным действием внешних капиллярных сил в трехфазных гранулах, что определяет появление резко выраженных тиксотропных свойств системы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов В.В. Определение реологических свойств твердообразных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов, с помощью конусной пенетрации. Часть 1. Теоретическое обоснование метода // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 2 (22). С. 72–82.
2. Белов В.В. Определение реологических свойств твердообразных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов, с помощью конусной пенетрации. Часть 2. Приборное обеспечение // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 3 (23). С. 70–78.
3. Структурно-топологические особенности кинетических процессов / А.Н. Бобрышев [и др.] // *Вестник отделения строительных наук РААСН*. 2000. Вып. 3. С. 109–114.
4. Иванов Я.П. Реологические свойства бетонной смеси и цементных паст. Технологическая механика бетона. Рига: РПИ, 1976. С. 33–44.
5. Иванов Я. О реологии цементных паст, растворов и бетонных смесей. *Механика сплошных сред: Сборник материалов*. София: БАН, 1968. С. 343–349.
6. Калашников В.И., Иванов И.А. Особенности реологических изменений цементных композиций под действием ионостабилизирующих пластификаторов // *Технологическая механика бетона: Сборник научных трудов*. Рига: РПИ, 1984. С. 103–118.
7. Берней И.И., Белов В.В. Силы капиллярного сцепления и их влияние на технологию и свойства строительных материалов // *Производство и применение асбестоцемента: Межвузовский тематический сборник*. Калинин: Калинин. ун-т, 1979. С. 3–44.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Белов В.В. Определение реологических свойств твердообразных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов, с помощью конусной пенетрации. Часть 3. Экспериментальные исследования // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 4 (24). С. 68–74.

---

**DETERMINATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES  
OF SOLID DISPERSED SYSTEMS USED IN THE PRODUCTION  
OF BUILDING MATERIALS APPLYING CONE PENETRATION TECHNIQUE.  
PART 3. PILOT STUDIES**

*V.V. Belov*

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article describes how, using a penetration viscometer and a specially developed technique, the limiting shear stress and viscosity were measured in compacted solid three-phase dispersed systems: hammer-moistened sand of various dispersities, mixtures of ground and Volsky sand of natural dispersion and cement-sand mixtures. It is noted that the obtained dependences of rheological characteristics on humidity, specific surface area and porosity show a direct relationship between the rheological properties of three-phase dispersed systems with capillary coupling. This makes it possible to effectively influence the amount of capillary adhesion and the associated rheological properties of dispersed systems used for the production of building materials.

**Keywords:** structured dispersed systems, ultimate shear stress and viscosity, cone penetration method, cone rheometer.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

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

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Belov V.V. Determination of rheological properties of solid dispersed systems used in the production of building materials applying cone penetration technique. Part 3. Pilot studies // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 68–74.

УДК 543.48

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РАСТВОРЕНИЯ МЕДИ  
ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ  
С БИС(ЦИКЛОГЕКСАНОН)ОКСАЛИЛДИГИДРАЗОНОМ  
ПРИ ОБРАЗОВАНИИ РАЗНОЛИГАНДНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

*С.Л. Горцевич<sup>1</sup>, А.И. Пичугина<sup>1</sup>, А.Е. Соболев<sup>1,2</sup>, В.Д. Меденков<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

<sup>2</sup>*Тверской государственный медицинский университет (г. Тверь)*

© Горцевич С.Л., Пичугина А.И.,  
Соболев А.Е., Меденков В.Д., 2024

**Аннотация.** Исследована кинетика окислительного растворения меди при образовании разнолигандных комплексов. Методом вращающегося диска и количественным определением металла фотометрическим методом с бис(циклогексанон)оксалилдигидразоном определены кинетические параметры процесса растворения, получена математическая модель зависимости скорости перехода меди в раствор от параметров процесса.

**Ключевые слова:** кинетика окислительного растворения, энергия активации, константа скорости, купризон.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-75-80**

**ВВЕДЕНИЕ**

Известно большое число методик определения содержания меди(II) с помощью физических и физико-химических методов анализа, но они зачастую обладают невысокой чувствительностью и избирательностью, требуют применения токсичных органических экстрагентов, сложной пробоподготовки и использования дорогостоящего оборудования. В настоящее время в аналитической практике активно развиваются и применяются комбинированные методы, в которых сочетаются сорбционное концентрирование и последующее определение в твердой фазе. За счет этого можно достичь повышения избирательности определения, а также возможности определения элементов на уровне предельно допустимых концентраций и ниже, автоматизировать процесс определения.

Совершенствование и интенсификация гидрометаллургических процессов извлечения меди из руд и вторичного сырья базируются на изучении кинетики растворения. Продолжаются разработки реагентов-растворителей, которые представляют собой водные растворы окислителя и лигандов. В таких системах могут образовываться прочные комплексы меди, в результате происходят окисление металла, а также переход его в раствор. Применение кислорода в качестве окислителя исключает проблему регенерации реагентов.

**МЕТОДЫ, МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ**

Исследование кинетики окислительного растворения меди проводилось методом вращающегося диска в присутствии комплексообразователей (тиоцианата, тиомочевины). Определение скорости реакции основано на фотометрическом методе анализа металла в виде окрашенного комплекса с купризоном. Ионы двухвалентной меди образуют прочный комплекс голубого цвета при  $\text{pH} = 9,2\text{--}9,5$ .

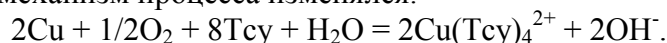
Интенсивность окраски комплекса пропорциональна концентрации меди в растворе. Этим методом можно обнаружить 1,5 мкг меди в 50 см<sup>3</sup> рабочего раствора при длине волны 590–610 нм.

Проведение анализа требует предварительной подготовки проб: кислотного разложения комплексных соединений меди и отделения металла от мешающих элементов.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ**

*Влияние концентрации тиоцианата калия.* Взаимодействие металлической меди с нейтральными растворами тиоцианата калия в присутствии (в качестве окислителя) кислорода воздуха предварительно было изучено методом растворения дисперсного материала, а именно путем определения равновесных концентраций меди в растворе.

Анализ системы  $\text{Cu-H}_2\text{O-O}_2$  показал, что в условиях проведения опытов медь в растворах не обнаружена. Однако в ходе добавления в раствор тиоцианата при продувке кислородом воздуха механизм процесса изменялся:



Таким образом, наличие лигандов, связывающих медь в комплекс, способствует смещению равновесия данной реакции и повышению растворимости меди.

Влияние концентрации комплексообразователя на растворимость металлической меди показано на рис. 1.

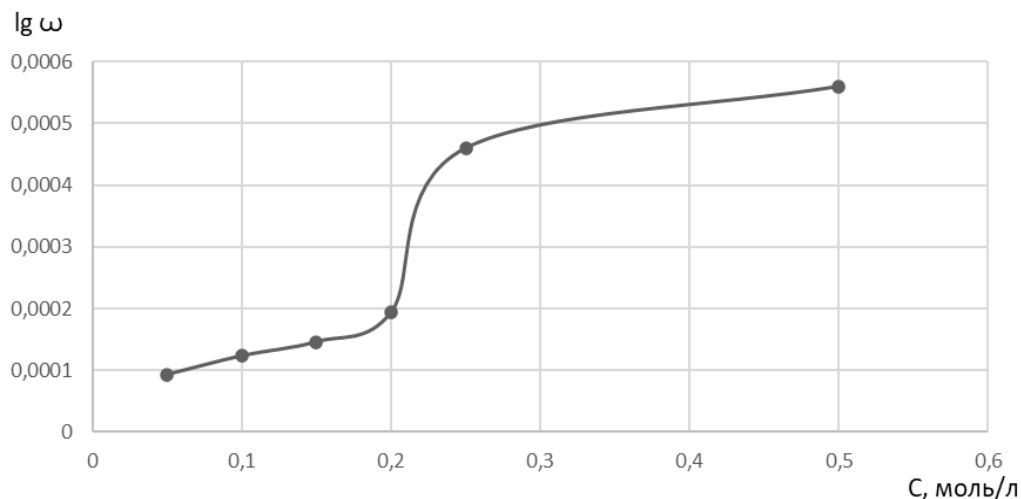


Рис. 1. Влияние концентрации комплексообразователя на растворимость металлической меди

График зависимости растворимости от концентрации тиоцианата имеет типичный характер для подобных систем. При изменении концентрации одного из реагентов рост

растворимости происходит до предела концентрации тиоцианата, равного 0,25 моль/л (рис. 2).

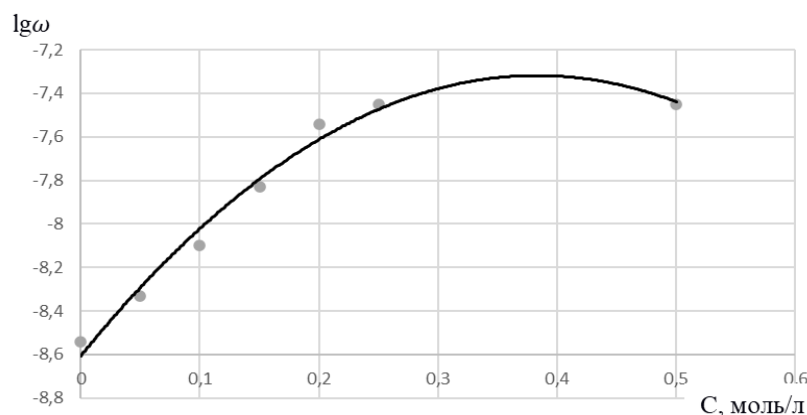


Рис. 2. График зависимости скорости растворения  $\text{Cu}$  от концентрации тиоцианата при  $T = 298 \text{ K}$ ,  $\text{pH} = 3$ ,  $n = 10 \text{ об/с}$ , концентрация тиоцианата – от 0 до 0,5 моль/л

С увеличением исходной концентрации тиоцианата скорость окисления меди сначала резко увеличивается (до предельной области; порядок реакции по концентрации тиоцианата равен 0,91), а затем, по достижении фиксированной концентрации, эта скорость практически не меняется (запредельная область реакции по концентрации тиоцианата приближается к нулю).

*Влияние частоты вращения диска.* Опыты проведены с целью дальнейшего уточнения характера лимитирующей стадии процесса окисления меди, поскольку зависимость скорости от числа оборотов диска позволяет однозначно ответить на вопрос о режиме протекания процесса. Условия опытов:  $T = 298 \text{ K}$ ;  $[\text{Cu}] = 0,25 \text{ M}$ ; число оборотов изменяли от 1,6 до 25 об/с (рис. 3).

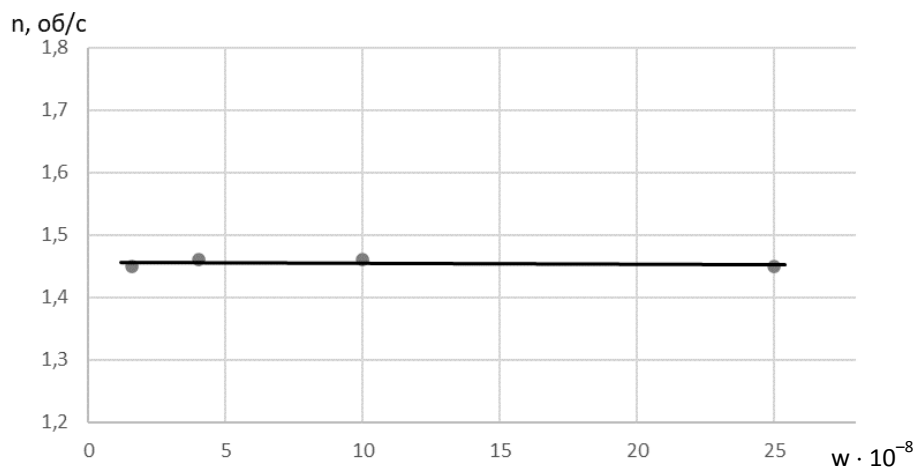


Рис. 3. Влияние скорости вращения диска на растворение меди

Отсутствие зависимости скорости растворения от частоты вращения диска свидетельствует о протекании процессов в кинетической области. Об этом также говорит и высокая энергия активации данного процесса.

*Влияние температуры на скорость растворения металлической меди.* Опыт проводили в интервале температур 288–318 К, величина энергии активации составила 56,9 кДж, а константы скорости –  $4,05 \cdot 10^{-10}$ . В данном случае отмечалось тормозящее действие химической стадии, что также подтверждает протекание процесса растворения в кинетической области (рис. 4).

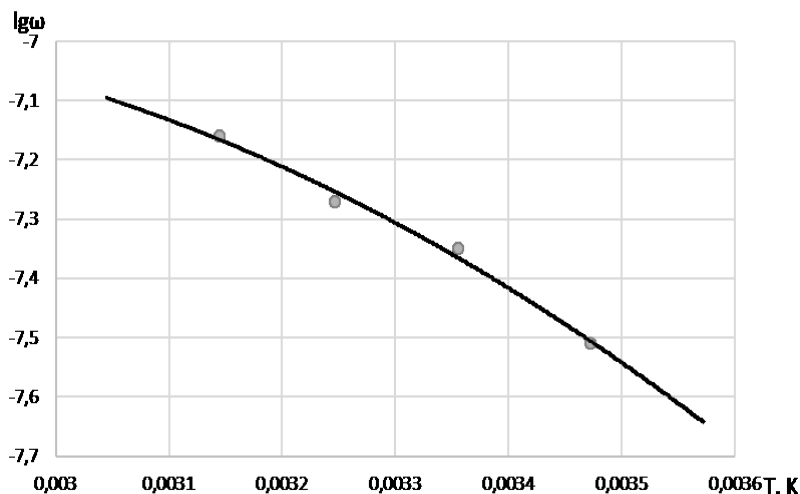


Рис. 4. График зависимости скорости растворения меди от температуры

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом нелинейной аппроксимации рассчитаны кинетические характеристики процесса окисления меди, предложена математическая модель, описывающая зависимость скорости растворения от концентраций комплексообразователя и окислителя:

$$W = 87,046 \times 10^{-7} [Tcy]^{0,85}.$$

Экспериментальная энергия активации составила 28,1 кДж/моль, реакция протекала во внешнедиффузионном режиме, лимитирующая стадия – диффузия комплексов меди от поверхности в объем раствора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горичев И.Г., Михальченко Н.С., Зенченко Н.С. О механизме влияния комплексонов на скорость растворения оксидов железа и меди // *Координационная химия*. Т. 15. № 10. С. 1324–1330.
2. Колотыркин Я.М. Влияние анионов на кинетику растворения металлов / Я.М. Колотыркин // *Успехи химии*. 1962. Т. 31. № 3. С. 322–335.
3. Kolotyркин Ya.M. Achievements in Advancing the Electrochemical Theory of Corrosion // *Brit. Corr. J.* 1980. Vol. 15. No. 3, pp. 102–110.
4. Hauser A.K., Newman J. Effects of Finite Rates of a Homogeneous Reaction on the Steady-State Dissolution of Copper in Chloride Solutions // *J. Electrochem. Soc.* 1989. Vol. 136. No. 11, pp. 3249–3255.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

*ГОРЦЕВИЧ Светлана Леонидовна* – 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

*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

*СОБОЛЕВ Александр Евгеньевич* – кандидат химических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22; доцент кафедры химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный медицинский университет» Минздрава России, 170000, г. Тверь, ул. Советская, 4.

*МЕДЕНКОВ Вячеслав Дмитриевич* – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Горцевич С.Л., Пичугина А.И., Соболев А.Е., Меденков В.Д. Исследование кинетики растворения меди фотометрическим методом с бис(циклогексанон)оксалилдигидразоном при образовании разнолигандных комплексов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 4 (24). С. 75–80.

---

**INVESTIGATION OF THE KINETICS OF COPPER DISSOLUTION  
BY THE PHOTOMETRIC METHOD WITH BIS(CYCLOHEXANONE)OXALYL  
DIHYDRAZONE IN THE FORMATION OF MULTI-LIGAND COMPLEXES**

*S.L. Gortsevich<sup>1</sup>, A.I. Pichugina<sup>1</sup>, A.E. Sobolev<sup>1,2</sup>, V.D. Medenkov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Tver State Technical University (Tver)*

<sup>2</sup>*Tver State Medical University (Tver)*

**Abstract.** The kinetics of oxidative dissolution of copper at formation of dissimilar ligand complexes has been investigated. The kinetic parameters of the dissolution process were determined by the rotating disk method and quantitative determination of metal by photometric method with bis(cyclohexanone)oxalyl dihydrazone, and a mathematical model of the dependence of the rate of copper transition into solution on the process parameters was obtained.

**Keywords:** kinetics of oxidative dissolution, activation energy, rate constant, cuprizon.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*GORTSEVICH Svetlana Leonidovna* – 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

*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

*SOBOLEV Alexander Evgenievich* – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia; Associate Professor of the Department of Chemistry, Tver State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, 4, Sovetskaya Str., 170000, Tver.

*MEDENKOV Vyacheslav Dmitrievich* – Undergraduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Gortsevich S.L., Pichugina A.I., Sobolev A.E., Medenkov V.D. Investigation of the kinetics of copper dissolution by the photometric method with bis(cyclohexanone)oxalyl dihydrazone in the formation of multi-ligand complexes // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 75–80.

УДК 544.773.2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОТВЕРЖДЕНИЯ НЕПРЕДЕЛЬНЫХ ПОЛИЭФИРНЫХ СМОЛ МЕТОДОМ МНОГОКРАТНОГО НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

*А.И. Пичугина, Н.Ю. Старовойтова, М.В. Оспенников*  
*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Пичугина А.И., Старовойтова Н.Ю.,  
Оспенников М.В., 2024

**Аннотация.** Проведено исследование процессов отверждения предускоренной ненасыщенной полиэфирной смолы методом ИК-Фурье-спектроскопии с использованием приставки многократного нарушенного полного внутреннего отражения. Получено оптимальное соотношение компонентов для достижения максимальной прочности полимера и минимальной эмиссии вредного стирола в окружающую среду.

**Ключевые слова:** ненасыщенная полиэфирная смола, степень отверждения, перекись метилэтилкетона, ИК-Фурье-спектроскопия.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-80-85**

#### ВВЕДЕНИЕ

Исследование свойств непредельных полиэфирных смол имеет большое значение для промышленности. Знание аналитических зависимостей некоторых характеристик, изучаемых в этой работе, позволит производить материалы с лучшими свойствами.

В настоящей работе рассматриваются композиции на основе полиэфирной смолы СПЭФ-ST-10 (RTM), различающиеся по составу в плане влияния количества отвердителя



на их конечные свойства. Были проведены испытания смешения связующего на основе ненасыщенной полиэфирной смолы и детальное исследование его отверждения методом ИК-Фурье-спектроскопии с применением приставки многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО).

### МЕТОДЫ, МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ

В работе использовалась смола СПЭФ-ST-10 (RTM) производителя «ПластПолиэфир». Это смола полиэфирная ненасыщенная предускоренная, имеющая низкую эмиссию стирола, отличную пропитывающую способность, индикатор отверждения. Она характеризуется быстрой полимеризацией при относительно большом времени гелеобразования.

В качестве отвердителя применяли перекись метилэтилкетона (ПМЭК) марки Butanox M-50 от производителя Nouryon Chemicals B.V.

Образцы смолы исследуемой марки СПЭФ-ST-10 (RTM) получали путем взвешивания на аналитических весах с разным содержанием отвердителя ПМЭК (0,7; 1,0; 1,4; 1,8 %) и тщательно перемешивали. Далее композицию заливали в форму до определенной толщины.

В исследовании использовалась приставка МНПВО36 горизонтального типа для ИК-Фурье-спектрометра ФСМ-2201. Работа приставки основана на применении метода МНПВО. Пробоподготовка не требуется: исследуемый образец достаточно поместить в ванночку, дно которой образовано призмой МНПВО. Полимерные образцы механически прижимают к поверхности призмы с помощью специального прижима.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Реакция отверждения ненасыщенных полиэфирных смол представляет собой радикальную сополимеризацию растворителя (каковым одновременно является мономер) с реакционноспособными двойными связями олигомерного полиэфира.

После добавления 1–4 % пероксидного инициатора начинается радикальная сополимеризация между виниловым мономером (стиролом) и полиненасыщенной макромолекулой. На бывших двойных связях от двух до трех звеньев стирола образуют связи с соседними макромолекулами, после чего запускается процесс сшивания (рис. 1). Следовательно, при увеличении количества отвердителя число связей  $C=C$  должно пропорционально уменьшаться. На рис. 2 представлены спектры анализируемой смолы с варьируемым количеством отвердителя.

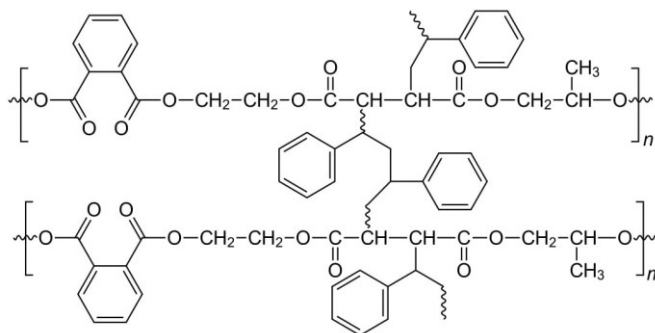


Рис. 1. Сшивание ненасыщенной полиэфирной смолы

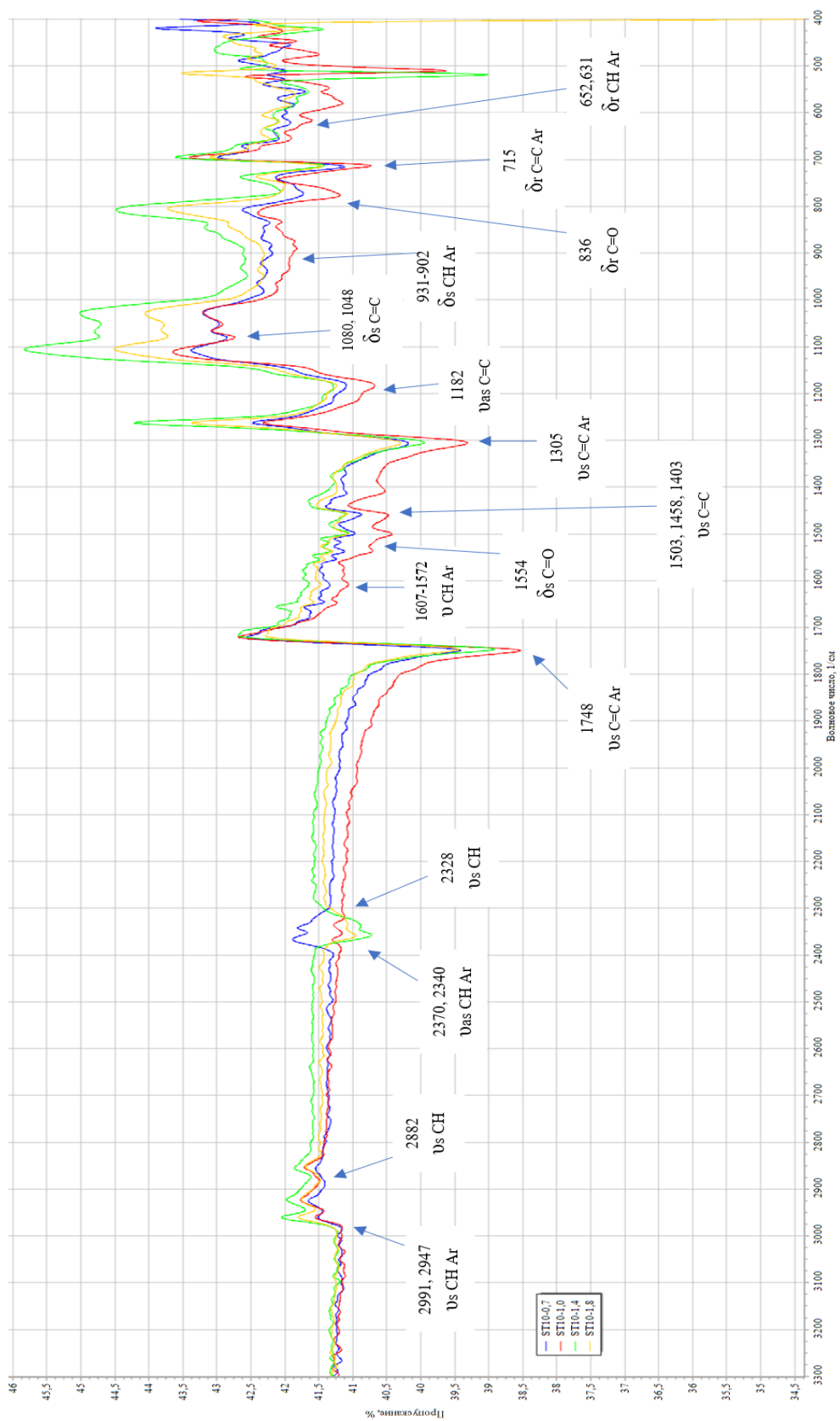


Рис. 2. Сравнение спектров смолы СПЭФ-СТ-10 (RTM) с изменяемым количеством отвердителя (0,7; 1,0; 1,4; 1,8 %)

Анализируемый диапазон можно ограничить областью  $3\,300\text{ см}^{-1}$ . Отсутствие интенсивности пиков поглощения в диапазоне  $3\,000\text{--}3\,300\text{ см}^{-1}$  связано с отсутствием гидроксильных групп в исследуемом образце.

Области  $2\,991, 2\,947\text{ см}^{-1}$  относятся к С-Н-симметричным валентным колебаниям ароматических групп  $\nu_{s(\text{CH})_{\text{Ar}}}$ , что подтверждается дублирующими асимметричными валентными колебаниями  $\nu_{as(\text{CH})_{\text{Ar}}}$  и деформационными колебаниями в областях интенсивности  $2\,370, 2\,340\text{ см}^{-1}$  (обертонными) соответственно.

Кроме того, наблюдаются множественные валентные колебания С-Н-ароматического ряда в областях  $1\,607, 1\,586, 1\,572\text{ см}^{-1}$ , подтверждающиеся наличием плоских деформационных ножничных колебаний в области «отпечатков пальцев»  $931\text{--}902\text{ см}^{-1}$  и неплоскостных деформационных маятниковых колебаний в областях  $652, 631\text{ см}^{-1}$ .

Ярко выраженная отличительная полоса валентных колебаний  $\nu_{sv(\text{C}=\text{C})_{\text{Ar}}}$  находится в областях  $1\,748, 1\,305\text{ см}^{-1}$  и охватывает область «отпечатков пальцев», а также деформационные колебания  $715\text{ см}^{-1}$ .

Интенсивные валентные колебания С-Н алифатических групп наблюдаются в областях  $2\,882, 2\,328\text{ см}^{-1}$ .

Наличие связей С=С алифатических групп определяют валентные колебания в областях  $1\,503, 1\,458, 1\,403\text{ см}^{-1}$ , а также деформационные плоскостные ножничные колебания в областях  $1\,182, 1\,080, 1\,048\text{ см}^{-1}$ .

Незначительные по интенсивности деформационные ножничные колебания в области  $1\,554\text{ см}^{-1}$  доказывают присутствие связей С=О в области «отпечатков пальцев» и наличие маятниковых колебаний –  $836\text{ см}^{-1}$ .

Наличие отчетливых пиков в областях  $767\text{ см}^{-1}$  и  $715\text{ см}^{-1}$  свидетельствует об ортоналожении карбоксильных групп в ароматическом кольце.

Интенсивность сигналов по мере увеличения содержания отвердителя возрастает лишь до определенного момента. При добавлении 1,4 % отвердителя интенсивность в некоторых случаях перестает меняться или снижается (см. рис. 2). Конверсия процесса отверждения хорошо видна на участке  $1\,748\text{ см}^{-1}$ . В этой области наблюдается снижение интенсивности связей С=С по мере увеличения количества добавляемого отвердителя (рис. 3).

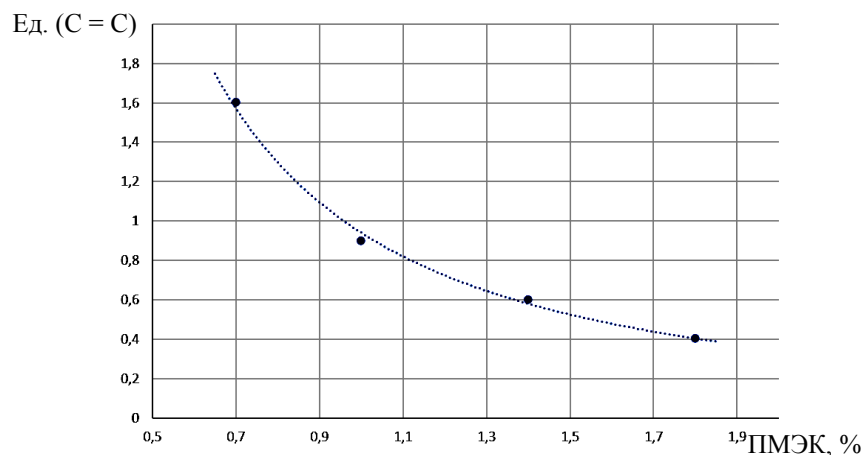


Рис. 3. Зависимость содержания связей С=С алифатических групп от количества отвердителя

Данная связь обусловлена нагревом в процессе отверждения. Так, в определенный момент температура смеси достигает температуры кипения отвердителя (стирола), в результате чего он испаряется, не успевая прореагировать с реакционными центрами.

На рис. 4 показано изменение содержания связей  $C=C$  ароматических групп под влиянием отвердителя. При добавлении 1,4 % отвердителя дальнейшее увеличение его концентрации отрицательно влияет на процесс, так как не все реакционные центры ароматических групп успевают сшиться.

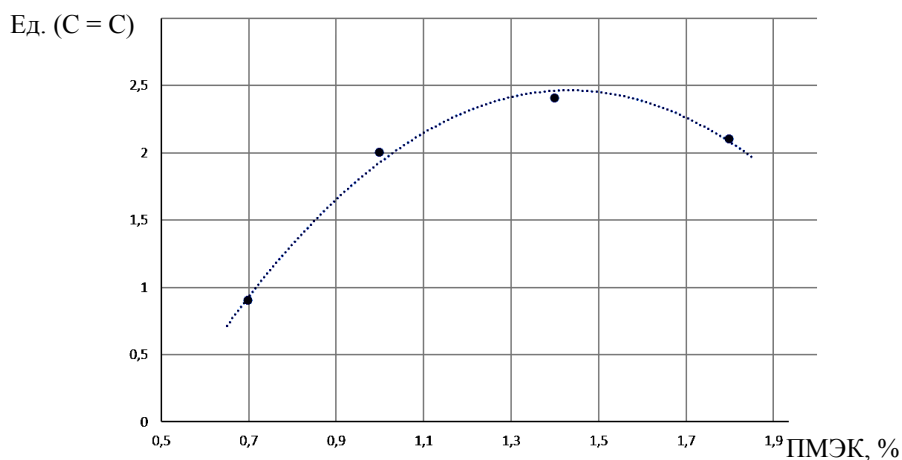


Рис. 4. Зависимость содержания связей  $C=C$  ароматических групп от количества отвердителя

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из получившихся спектров следует, что оптимальное количество отвердителя соответствует 1,4 %. Дальнейшее увеличение концентрации приводит к хрупкости сшитого полимера и высокой эмиссии вредного стирола в окружающую среду.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шимкин А.А., Гребенева Т.А., Меркулова Ю.И. Определение степени отверждения термореактивных связующих методами ИК-спектроскопии и дифференциальной сканирующей калориметрии // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. № 83 (8). С. 27–32.
2. ГОСТ Р 57941-2017. Композиты полимерные. Инфракрасная спектроскопия. Качественный анализ. М.: Стандартинформ, 2017. 27 с.
3. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
4. Романова Н.В., Шафигуллин Л.Н., Гумеров И.Ф., Гумеров М.И. Анализ полимерных композиционных материалов. Набережные Челны: НЧИ КФУ, 2017. 30 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

*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  
*ОСПЕННИКОВ Матвей Владимирович* – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Пичугина А.И., Старовойтова Н.Ю., Оспенников М.В. Исследование процессов отверждения неперелых полиэфирных смол методом многократного нарушенного полного внутреннего отражения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 4 (24). С. 80–85.

---

### INVESTIGATION OF THE CURING PROCESSES OF UNSATURATED POLYESTER RESINS BY THE METHOD OF MULTIPLE DISTURBED TOTAL INTERNAL REFLECTION

*A.I. Pichugina, N.Yu. Starovoitova, M.V. Ospennikov*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** A study of the curing processes of a pre-accelerated, unsaturated polyester resin by the method of IR-Fourier spectroscopy using the prefix of multiple disturbed total internal reflection was carried out. The optimal ratio of components has been obtained to achieve maximum polymer strength and minimum emission of harmful styrene into the environment.

**Keywords:** unsaturated polyester resin, degree of curing, methyl ethyl ketone peroxide, Fourier infrared 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

*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

*OSPENNIKOV Matvey Vladimirovich* – Undergraduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Pichugina A.I., Starovoitova N.Yu., Ospennikov M.V. Investigation of the curing processes of unsaturated polyester resins by the method of multiple disturbed total internal reflection // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 80–85.

УДК 665.775.4

**ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО БОРЬБЫ  
С ПРЕЖДЕВРЕМЕННЫМ РАЗРУШЕНИЕМ  
АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ В ЗОНЕ СТЫКОВ***Е.О. Прокудин<sup>1</sup>, В.В. Савицкий<sup>1</sup>, В.Е. Николаевский<sup>1</sup>, Д.Ю. Небрatenко<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>Российский университет транспорта (г. Москва)**<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный  
строительный университет (г. Москва)*© Прокудин Е.О., Савицкий В.В.,  
Николаевский В.Е., Небрatenко Д.Ю., 2024

**Аннотация.** В статье указано, что сроки службы дорожных покрытий для автомобильных дорог федерального значения определены Постановлением Правительства РФ от 30 мая 2017 г. № 658 и составляют 24 года для всех категорий. В предыдущем Постановлении (от 23 августа 2007 г. № 539 с изменениями 2015 г.) эти сроки составляли 12 лет. Отмечено, что увеличение межремонтных сроков в два раза должно сопровождаться резким повышением качества строительства дорог, появлением прорывных проектных, конструктивных и технологических решений, однако капитальный ремонт дорожных одежд по-прежнему проводится через 10–12 лет, причем обычно ссылаются на суровые климатические условия, рост транспортных нагрузок, недостатки проектирования, нарушение технологии. Даже при качественной укладке в асфальтобетонных покрытиях находятся зоны, на которых появляются признаки разрушения уже после первого сезона эксплуатации. Это стыки в теле слоя покрытия, где вновь укладываемая смесь примыкает к уложенной ранее. Подчеркнуто, что причина банальна: в местах контакта весьма сложно обеспечить требуемую плотность и монолитность смеси. Предложено решить проблему «сращивания» между собой примыкающих фрагментов слоя покрытия на основе применения стыковочных битумно-полимерных лент, так как в России уже имеется опыт их применения, а мониторинг состояния покрытия в зоне стыков свидетельствует о том, что использование битумно-полимерных стыковочных лент дает существенные преимущества за счет обеспечения монолитности соединения в течение нормативного срока эксплуатации.

**Ключевые слова:** стыковочные битумно-полимерные ленты, полимерно-битумные вяжущие, стыки сопряжения.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-86-94****ВВЕДЕНИЕ**

Сохранение стабильных характеристик битумсодержащих слоев является неременным условием обеспечения прочности и долговечности дорожных покрытий. Важно понимание того, как на это влияют состав и свойства компонентов асфальтобетона и полимерасфальтобетона. Именно отсутствие дефектов на дорожном покрытии позволяет автомобильной дороге выполнять свою функцию – функцию обеспечения безопасного круглогодичного движения транспорта с расчетными скоростями в течение нормативного срока службы при постоянном росте интенсивности и объема перевозок [1].

Рано или поздно на покрытиях автодорог возникают дефекты. Как правило, предвестниками разрушения являются шелушение и выкрашивание материала с последующим нарушением сплошности асфальтобетонных покрытий в зоне швов сопряжения. Это стыки в полосах асфальтобетонного покрытия (продольные и поперечные), а также сопряжения с различными конструктивными элементами [2]. И эти «центры разрушения» формируются еще на этапе проектирования и строительства, поскольку невозможно избежать температурной и гранулометрической сегрегации асфальтобетонной смеси при ее контакте с уложенным ранее слоем. В связи с этим возникает повышенная остаточная пористость, а также отсутствует монолитность в области стыка.

### ***МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ***

Действенным средством борьбы с вышеописанными проблемами являются стыковочные битумно-полимерные ленты (СБПЛ). В США и странах Западной Европы стыковочные ленты распространены достаточно широко и уже доказали свою эффективность.

Для России стыковочные битумно-полимерные ленты – это сравнительно новый материал, представляющий собой профилированную ленту, сохраняющую свою геометрическую целостность при высоких температурах до момента применения. Но в отличие от западного аналога, основанного на битумно-каучуковом вяжущем, отечественные стыковочные ленты изготавливаются из битумно-полимерного композитного вяжущего (ПБВ). И это не случайно. Главным качественным показателем ПБВ для стыковочных лент является его способность проникать в структуру контактирующих слоев, обеспечивая сцепление, приводящее к образованию единого монолита. Более того, за счет высокомолекулярных компонентов (в сравнении с битумами нефтяными дорожными) ПБВ не только лучше справляется с решением данной задачи, но и сохраняет свои качественные показатели на протяжении всего срока эксплуатации объекта [3].

Стыковочная битумно-полимерная лента, расположенная на стыке полос, при нагревании от горячей асфальтобетонной смеси переходит в вязкотекучее состояние и обволакивает всю поверхность контакта, проникая в неровности, заклинивается в них при остывании. Таким образом, на основании механической теории адгезии обеспечивается прочность стыков.



Рис. 1. Внешний вид стыковочной битумно-полимерной ленты

По результатам различного рода исследований установлено, что адгезионное соединение зависит от таких факторов, как состав и структура адгезива и субстрата, геометрические параметры объекта, природы фаз, вступающих в контакт, а также условия, при которых будет формироваться адгезионное соединение [4].

«Прилипание» – процесс образования прочной связи в точке контакта адгезива и субстрата, т.е. образования зоны сцепления. «Адгезия» – показатель прочности связи [5–7].

В слое дорожного покрытия (как многокомпонентной системе) на качество адгезионного соединения оказывают влияние факторы, основными из которых являются:

- химический состав щебня;
- структура его поверхности (наличие макро- и микроразвитых поверхностей, микродефектов, открытых пор и полостей);
- физико-химические свойства вяжущего;
- температура, при которой осуществляется процесс.

Известно, что щелочные породы сцепляются с окисленными битумными композициями лучше, чем кислые. Это объясняется наличием на поверхности осадочных пород гидроксильных групп, которые взаимодействуют с кислородом воздуха и более склонны к химическим и ван-дер-ваальсовым взаимодействиям с поверхностным слоем «закисленного» вяжущего. Поскольку дорожные битумы сильно окисляются на стадии производства, при наличии обменных ионов в виде гидроксильных групп на поверхности щебня могут происходить окислительно-восстановительные реакции [8].

Наличие макро- и микроразвитых поверхностей, микродефектов, открытых пор и полостей позволяет компонентам вяжущего, особенно полимерным цепям, проникать, диффундировать и отверждаться в открытых полостях наружного слоя камня. В этом случае полимер выступает в роли анкера как в основном объеме связующего, так и в порах каменного материала, куда уже проникла достаточная часть цепей для обеспечения прочного сцепления [9, 10].

С одной стороны, битумное вяжущее должно содержать низкомолекулярные компоненты, обладающие большой подвижностью и способные проникать в соседний массив смежного материала на значительную глубину. Для этого указанные компоненты должны иметь малые размеры и форму. С другой стороны, полимерные материалы, присутствующие в дорожных смесях исключительно в качестве компонентов вяжущего, обладают достаточной прочностью длинных цепей, чтобы проникать в поры камня и заклиниваться в массиве или пограничном слое вяжущего. Возможность переплетения полимерных цепей без образования химических связей в месте связывания обеспечивает высокий показатель прочности в месте связывания щебеночных компонентов смеси и гарантирует эластичность и большую растяжимость вяжущего материала без разрушения. Этим и объясняется проявление когезии в ПБВ [11–13].

Для процесса образования контакта между поверхностью твердого камня и связующим материалом, кроме всего, нужна соответствующая температура, активизирующая физико-химические процессы как на границе раздела фаз, так и в объеме каждой из них [14, 15].

Бутадиен-стирольные термоэластопласты (СБС-полимеры) представляют собой единую двухблочную макромолекулу из двух мономеров (стирола и бутадиена), соединенных прочными химическими связями. Взаимодействующая с ними мальтеновая фаза начинает встраиваться в структурные области полимера, доокисляясь при этом в



низкомолекулярные смоляные составляющие битума. В результате увеличивается начальная вязкость композиции и улучшаются адгезионные свойства поверхностного слоя [16–19].

Для того чтобы обеспечить сцепление СБПЛ с дорожным покрытием, перед нанесением необходимо провести очистку самого покрытия от различного рода загрязнений: пыли, грязи, снега и т.д.

При условии проведения работ при температуре ниже 10 °С нужно выдержать ленту в сухом помещении в температурном диапазоне от 15 до 20 °С.

Технология применения СБПЛ заключается в следующем: изготовленную ленту с промежуточным антиадгезионным вкладышем сворачивают в рулон и упаковывают в картонный контейнер [20]. На объекте ленту извлекают из упаковки и распределяют вдоль края стыка, устанавливая на ребро таким образом, чтобы антиадгезионная пленка находилась с внешней стороны (рис. 2).



а

б

Рис. 2. Стыковочная дорожная лента:

- а – упаковочный картонный барабан с информацией о ленте;
- б – бумажный слой с антиадгезионным покрытием для предотвращения слипания рулонов ленты при транспортировке и хранении

Чтобы лента надежно прикрепилась к краю стыка, необходимо периодически прижимать ее к вертикальной поверхности. После установки ленты антиадгезионный слой удаляется (рис. 3). Каждая последующая лента должна примыкать к предыдущей встык. Соединение внахлест не допускается, так как приводит к образованию избытка вяжущего, а также битумных пятен на поверхности покрытия. В процессе укладки и уплотнения горячей асфальтобетонной смеси необходимо осуществлять контроль за положением ленты на стыке с ранее уложенным покрытием.

На протяжении всего этапа образования шва между новым и ранее уложенным слоями асфальтобетонного покрытия СБПЛ претерпевает ряд механических и физико-химических преобразований, за счет которых достигается монолитность зоны контакта.

Изложенные выше положения должны опираться на детальное изучение поведения СБПЛ во вновь сформированном покрытии (температура окружающей среды в зоне укладки – 14 °С; температура асфальтобетонной смеси – 140 °С). С этой целью в зоне шва проведено извлечение нескольких кернов, в состав которых входит СБПЛ (рис. 4).



Рис. 3. Распределение СБПЛ с прикреплением к вертикальной поверхности стыка



Рис. 4. Внешний вид образца после послойного разрезания керна, взятого в месте стыка для контроля расположения ленты

Керны были отобраны электрическим керноотборником Keos KS-KB200/250SET, (2 800 Вт), закрепленным на штативе. Направление вращения рабочего органа совпадало с основным ходом движения по полосе.

Данные таблицы и вид кривой (см. рис. 4) подтверждают, что вяжущее, использованное при производстве СБПЛ, достаточно равномерно распределяется как по поверхности старого асфальтобетона, так и в объеме горячей асфальтобетонной смеси, укладываемой в зоне стыка. Отклонение от центральной линии по оси СБПЛ не превышает 15–20 %. Однако с увеличением расстояния от поверхности асфальтобетонного покрытия растекаемость СБПЛ снижется и выравнивание содержания вяжущего в холодном и горячем слоях ухудшается.

Ширина зоны распределения  
битумно-полимерного компонента из состава СБПЛ в зоне шва

Глубина от поверхности покрытия, мм	Зона примыкания горячей асфальтобетонной смеси, мм	Центральная зона по ширине СБПЛ, мм	Зона холодного асфальтобетона, мм
10	1,5	0,6	0,9
15	1,5	0,8	0,7
20	1,4	1,0	0,6
25	1,2	1,2	0,6
30	0,8	1,8	0,2
35	0,8	1,8	0,2
40	1,0	1,8	0
50	1,0	2,0	0

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние несколько лет использование СБПЛ было инициативно апробировано на дорожных объектах различных уровней подчиненности. В настоящее время ведется систематический мониторинг состояния объектов, на которых были использованы СБПЛ. При этом внимание уделяется не только составу битумно-полимерных композитов, используемых для производства лент (марке и индексу исходного вяжущего, содержанию и свойствам применяемых модификаторов, соотношениям компонентов), но и геометрии соединительных лент (ширине, толщине, наличию фасок). Кроме того, технологичность использования ленты требует от потребителей оценки антиадгезионных свойств прокладочных пленок.

Анализируя полученные в рамках исследования данные, можно сделать вывод, что СБПЛ являются новым дорожно-строительным материалом, их применение не требует приобретения дополнительных технических средств механизации, а квалификация работников подрядных подразделений отрасли позволяет им выполнять все технологические операции в соответствии с имеющимся техническим регламентом проведения работ. При этом они обеспечивают улучшение стабильности зоны стыка и препятствуют раскрытию трещин как в зоне продольного, так и в зоне поперечного контакта свежего и бывшего в эксплуатации асфальтобетонного покрытия.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Лукьянец П.А., Небрatenко Д.Ю., Лушников Н.А. Динамика изменения шероховатости асфальтобетонных и полимерасфальтобетонных покрытий // *Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика*. 2022. № 3. С. 15–28.
2. Санакулов А.Б., Лебедев Е.В., Небрatenко Д.Ю. Битумно-полимерные стыковочные ленты для усиления верхних слоев автомобильных дорог // *Вестник ГГНТУ. Технические науки*. 2022. № 3 (29). С. 23–29.
3. Гохман Л.М. Дорожный полимерасфальтобетон. М.: Экон-Информ, 2017. 477 с.
4. Быстров Н.В. Нормирование свойств модифицированных битумов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. № 5 (20). С. 198–203.
5. Тугорский И.А., Потапов Е.Э., Шварц А.Г. Химическая модификация эластомеров. М.: Химия, 1993. 304 с.
6. Handbook of Surface and Interface Analysis, Methods for Problem Solving. 2nd Edn. / ed. by J.C. Riviere, S. Myhra. London: CRC Press, 2009. 682 p.
7. Поциус А. Клеи, адгезия, технология склеивания. СПб.: Профессия, 2016. 344 с.
8. Вильнав Ж.-Ж. Клеевые соединения. М.: Техносфера, 2007. 384 с.
9. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. М.: Химия, 1974. 392 с.
10. Чалых А.Е., Авгонов А.Б. Диффузия и сорбция низкомолекулярных веществ в блок-сополимерах // *Высокомолекулярные соединения*. 1975. № 6 (17). С. 1291–1296.
11. Чалых А.Е., Захарова Н.И., Алиев А.Д., Роговина Л.З. Кинетика сорбции и диффузии НМВ в блок-сополимерах // *Диффузионные явления в полимерах*. Рига: РПИ, 1977. С. 195–198.
12. Guo F., Pei J., Zhang J., Li R., Liu P., Wang D. Study on Adhesion Property and Moisture Effect between SBS Modified Asphalt Binder and Aggregate Using Molecular Dynamics Simulation // *Materials*. 2022. No. 15 (19), pp. 6912.
13. Эфа А.К., Цыро Л.В., Андреева Л.Н. Некоторые причины старения асфальтобетона и способы их устранения // *Химия и технология топлив и масел*. 2002. № 4. С. 5–9.
14. Nikolaevsky V., Duzhiy P., Nebratenko D.Yu. Evaluation of Low-temperature Properties of Mixtures of Bitumen and SBS Polymers of Various Topologies by the ABCD Method // *Vojnotehnički glasnik*. 2023. No. 3 (71), pp. 711–721. URL: <https://doi.org/10.5937/vojtehg71-44548> (дата обращения: 23.09.2024).
15. Новикова Е.Х. Развитие полимерных решений для дорожной отрасли // *Каучук и резина*. 2021. № 5 (80). С. 272–275.
16. Rossi C.O., Teltayev B., Angelico R. Adhesion Promoters in Bituminous Road Materials: a Review // *Applied Sciences*. 2017. Т. 7. № 5, pp. 524–534.
17. Serrano E., Tercjak A., Kortaberria G., Pomposo J.A., Mecerreyes D., Zafeiropoulos N.E., Stamm M., Mondragon I. Nanostructured Thermosetting Systems by Modification with Epoxidized Styrene-butadiene Star Block Copolymers. Effect of Epoxidation Degree // *Macromolecules*. 2006. No. 39, pp. 2254–2261.
18. Kashevskaya E.V., Boksha M.Yu., Isakov A.M., Nebratenko D.Yu. Závislosti Vlivu Struktury Polymerů SBS na Vlastnosti Polofoukaných a Oxidovaných Asfaltových Pojiv (2021) // *Zkoušení materiálů a konstrukcí vozovek*. ASFALTOVÉ VOZOVKY, České Budějovice, Czech Republic. 2021. pp. 2–3.
19. Герман Е.А. Теоретическая инноватика. СПб.: СПбПУ, 2018. 148 с.

20. СТО 22346590.001-2019 Битумно-полимерная лента «СВЕНСКАЯ». 2019. 24 с. URL: <https://russianhighways.ru/upload/iblock/0f1/11.-СТО.PDF> (дата обращения: 23.09.2024).

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*ПРОКУДИН Егор Олегович* – студент, лаборант кафедры автомобильных дорог, аэродромов, оснований и фундаментов, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9. E-mail: [prokudin.egor2112@yandex.ru](mailto:prokudin.egor2112@yandex.ru)

*САВИЦКИЙ Валерий Викторович* – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог, аэродромов, оснований и фундаментов, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9. E-mail: [info@rut-miit.ru](mailto:info@rut-miit.ru)

*НИКОЛАЕВСКИЙ Владимир Евстафьевич* – кандидат военных наук, доцент кафедры автомобильных дорог, аэродромов, оснований и фундаментов, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9. E-mail: [info@rut-miit.ru](mailto:info@rut-miit.ru)

*НЕБРАТЕНКО Дмитрий Юрьевич* – кандидат химических наук, доцент кафедры автомобильных дорог, аэродромов, оснований и фундаментов, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, доцент кафедры строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: [nebratenko@mail.ru](mailto:nebratenko@mail.ru)

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Прокудин Е.О., Савицкий В.В., Николаевский В.Е., Небрatenko Д.Ю. Эффективное средство борьбы с преждевременным разрушением асфальтобетонного покрытия в зонах стыков и швов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 4 (24). С. 86–94.

---

## AN EFFECTIVE MEANS OF COMBATING PREMATURE DESTRUCTION OF ASPHALT CONCRETE PAVEMENT IN THE AREAS OF JOINTS AND SEAMS

*E.O. Prokudin<sup>1</sup>, V.V. Savitsky<sup>1</sup>, V.E. Nikolaevsky<sup>1</sup>, D.Yu. Nebratenko<sup>1, 2</sup>*

<sup>1</sup>*Russian University of Transport (Moscow)*

<sup>2</sup>*National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow)*

**Abstract.** The article states that the service life of road surfaces for federal highways is determined by the Russian Government Resolution No. 658 of May 30, 2017 and is 24 years for all categories. In the previous Resolution (dated August 23, 2007, No. 539, as amended in 2015), these terms were 12 years. It is noted that the doubling of inter-repair periods should be accompanied by a sharp increase in the quality of road construction, the emergence of breakthrough design, structural and technological solutions, but major repairs of road pavements are still carried out after 10-12 years, usually referring to harsh climatic conditions, increased

traffic loads, design flaws, violation of technology. Even with high-quality paving, there are areas in asphalt concrete pavements that show signs of destruction after the first season of operation. These are joints in the body of the pavement, where the newly laid mix adjoins the previously laid mix. It is emphasized that the reason is trivial: at the points of contact it is very difficult to ensure the required density and monolithicity of the mixture. It was proposed to solve the problem of “splicing” of adjoining fragments of the pavement layer on the basis of application of bituminous-polymer jointing tapes, as in Russia there is already experience of their application, and monitoring of the pavement condition in the joint zone shows that the use of bituminous-polymer jointing tapes provides significant advantages by ensuring monolithic jointing during the period of the pavement paving.

**Keywords:** connecting bitumen-polymer tapes, polymer-modify bitumen, interface joints.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*PROKUDIN Egor Olegovich* – Student, Laboratory Assistant of the Department of Highways, Airfields, Foundations and Foundations, Russian University of Transport, 9, p. 9, Obraztsova str., Moscow, 127994, GSP-4, Russia. E-mail: prokudin.egor2112@yandex.ru

*SAVITSKY Valery Viktorovich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Highways, Airfields, Foundations and Foundations, Russian University of Transport, 9, p. 9, Obraztsova str., Moscow, 127994, GSP-4, Russia. E-mail: info@rut-miit.ru

*NIKOLAEVSKY Vladimir Evstafievich* – Candidate of Military Sciences, Associate Professor of the Department of Highways, Airfields, Foundations and Foundations, Russian University of Transport, 9, p. 9, Obraztsova str., Moscow, 127994, GSP-4, Russia. E-mail: info@rut-miit.ru

*NEBRATENKO Dmitry Yuryevich* – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Highways, Airfields, Foundations and Foundations, Russian University of Transport, 9, p. 9, Obraztsova str., Moscow, 127994, GSP-4, Russia; Associate Professor of the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe shosse, 129337, Moscow, Russia. E-mail: nebratenko@mail.ru

### CITATION FOR AN ARTICLE

Prokudin E.O., Savitsky V.V., Nikolaevsky V.E., Nebratenko D.Yu. An effective means of combating premature destruction of asphalt concrete pavement in areas of joints and seams // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 86–94.

УДК 543.241.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОТНЫХ ГРУПП В ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТЕ ОТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРОМЫШЛЕННОГО СИНТЕЗА ПОЛИМЕРА

*Н.Ю. Старовойтова<sup>1</sup>, А.И. Пичугина<sup>1</sup>, А.Г. Ковалев<sup>1</sup>, А.В. Николаев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Тверской государственной технической университет (г. Тверь)

<sup>2</sup>АО «Сибур-ПЭТФ» (г. Тверь)

© Старовойтова Н.Ю., Пичугина А.И.,  
Ковалев А.Г., Николаев А.В., 2024

**Аннотация.** В настоящей работе исследовано влияние физических параметров процесса поликонденсации полиэтилентерефталата на карбоксильное (кислотное) число. Данные получены методом фотометрического титрования. Выявлены зависимости концентрации карбоксильных групп в полимере от кислотного числа, измеряемого в процессе синтеза полиэтилентерефталата, а также характер зависимостей этих характеристик от некоторых физических параметров процесса (давления, температуры, объема реакционной смеси). Полученные результаты помогут операторам технологических установок рационально и оптимально управлять процессом синтеза.

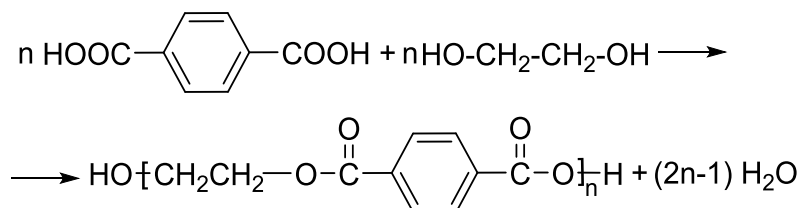
**Ключевые слова:** полиэферы, поликонденсация, полиэтилентерефталат, фотометрическое титрование.

**DOI:** 10.46573/2658-7459-2024-4-95-100

### ВВЕДЕНИЕ

Полиэтилентерефталат (ПЭТФ) является одним из крупнотоннажных полимеров и имеет широкое применение в различных отраслях: пищевой промышленности – при производстве бутылок для напитков, контейнеров для продуктов и упаковочных материалов; текстильной – при производстве волокон; медицинской – при изготовлении приспособлений, таких как пробирки и контейнеры для хранения биоматериалов [1].

Синтез ПЭТФ в промышленности осуществляется несколькими способами. В данной работе рассматривается прямая этерификация терефталевой кислоты (ТФК) этиленгликолем с дальнейшей поликонденсацией в высокомолекулярный продукт. Реакция проходит в две стадии: на первой образуется дигликольтерефталат, на второй – полиэтилентерефталат. Общее уравнение реакции имеет следующий вид:



Кислотные группы играют важную роль в реакционной способности мономеров и олигомеров. Изменения в концентрации этих групп могут существенно влиять на кинетику реакции, молекулярную массу и, соответственно, на физико-механические свойства материала. Таким образом, важным аспектом производства ПЭТФ является контроль карбоксильного числа (концентрации карбоксильных групп) на всех этапах синтеза. Его увеличение приводит к снижению средней длины цепей и, как следствие, уменьшению степени поликонденсации. Регулирование карбоксильного числа в определенном интервале предотвращает неконтролируемое течение реакции поликонденсации, приводящее к образованию полимера с нестабильными свойствами [2; 3].

Изучение влияния различных физических параметров на поликонденсацию позволяет разработать более эффективные производственные процессы. Параметры оказывают существенное воздействие на степень полимеризации и молекулярное распределение, что, в свою очередь, определяет механические свойства, устойчивость к воздействию внешних факторов и пригодность материала для различных применений. Оптимизация параметров на основе данных аналитического определения кислотных групп способствует повышению эффективности производства и качества продукции.

Фотометрическое титрование является наиболее точным и удобным методом контроля содержания свободных карбоксильных групп [4–6].

Цель настоящей работы заключается в исследовании методом фотометрического титрования влияния физических параметров синтеза ПЭТФ на кислотное число (КЧ) в этерификате и концентрацию карбоксильных групп в полимере. Для этого были изучены марки ПЭТФ, выпускаемые на АО «Сибур-ПЭТФ».

### МЕТОДЫ, МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ

Анализ кислотных групп проводился методом фотометрического титрования по нижеприведенным методикам [7–9].

*Методика определения содержания карбоксильных групп (КЧ) в продуктах этерификации.* Продукт этерификации растворяют в N, N-диметилформамиде, после чего концентрацию карбоксильных групп определяют методом титрования 0,1 N раствором КОН в этаноле. Кислотное число (мг КОН/г образца) рассчитывается по формуле

$$KЧ = \frac{(V - V_x) \cdot F \cdot N \cdot 56,1}{m},$$

где  $V$  – количество раствора щелочи, пошедшее на титрование пробы, см<sup>3</sup>;  $V_x$  – количество раствора щелочи, пошедшее на титрование холостой пробы, см<sup>3</sup>;  $N$  – нормальность раствора щелочи;  $F$  – фактор раствора щелочи;  $m$  – масса образца, г.

*Методика определения содержания концевых карбоксильных групп в полиэтилентерефталате и предполимере.* Полиэтилентерефталат растворяется при температуре кипения с обратным холодильником в смеси о-крезол/хлороформ в массовом соотношении 70/30. После охлаждения до комнатной температуры концевые карбоксильные группы определяются фотометрическим титрованием спиртовым раствором КОН (с бромфеноловым синим в качестве индикатора).

Концентрация карбоксильных групп (ммоль/кг) рассчитывается по формуле

$$C_{COOH}^{п} = \frac{(V_{np} - V_x) \cdot N \cdot F \cdot 1000}{m},$$

где  $C_{COOH}^{п}$  – концентрация карбоксильных групп в полиэтилентерефталате, ммоль/кг;  $V_{np}$  – количество раствора щелочи, пошедшее на титрование образца, см<sup>3</sup>;  $V_x$  – количество



раствора щелочи, пошедшее на титрование холостой пробы,  $\text{см}^3$ ;  $N$  – нормальность раствора щелочи;  $F$  – фактор 0,05н раствора щелочи;  $m$  – навеска образца, г.

Для эксперимента были взяты три марки ПЭТФ, которые производятся АО «Сибур-ПЭТФ»: ПЭТФ FF, ПЭТФ бутылочный, ПЭТФ ВВ [7–9]. Чтобы достичь достоверных результатов, использовали статистические данные, полученные центральной заводской лабораторией АО «Сибур-ПЭТФ» за 9 месяцев.

Пробы отбирались на обеих стадиях синтеза. На первой (этерификации ТФК этиленгликолем) отбиралась проба этерификата. Для нее определялось КЧ. На второй стадии (поликонденсации дигликолевого эфира ТФК) отбиралась проба гранулята. Здесь определялась концентрация концевых карбоксильных групп в полиэтилентерефталате  $C_{\text{COOH}}^{\text{п}}$ .

В целях анализа данных и построения зависимостей также были взяты данные физических параметров реактора этерификации 1-й ступени (расход этиленгликоля в реактор, уровень в реакторе, температура в реакторе, давление в реакторе) для каждой отдельной пробы.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных данных показал, что в пределах рабочих изменений значений давления и температуры их влияние на КЧ минимально, выраженной зависимости не наблюдается. Показатель коэффициента заполнения реактора  $\alpha$  ( $\alpha = v/v_p$ , где  $v$  – объем смеси,  $v_p$  – объем реактора) демонстрирует обратную линейную зависимость: повышение уровня в реакторе приводит к уменьшению КЧ (рис. 1).

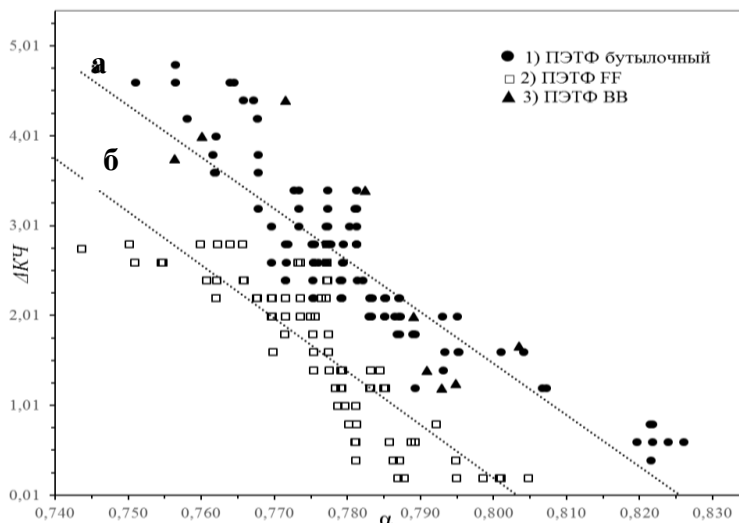


Рис. 1. Зависимость изменения кислотного числа  $\Delta KЧ$  (мг КОН/г) от коэффициента заполнения реактора  $\alpha$  для ПЭТФ бутылочного; ПЭТФ FF; ПЭТФ ВВ; а, б – линейные функции, построенные по средним значениям для ПЭТФ бутылочного и ПЭТФ FF соответственно

На рис. 1 приведены зависимости изменения КЧ ( $\Delta KЧ = KЧ_{\text{тек}} - KЧ_{\text{мин}}$ ) от коэффициента заполнения реактора  $\alpha$ . Для ПЭТФ ВВ функция не показана ввиду больших отклонений, возникших из-за недостаточного количества статистических данных.

На рис. 2 представлены графики зависимости изменения концентрации карбоксильных групп в полимере ( $C_{\text{COOH}}^{\text{п}}$ ) от изменения КЧ в этерификате для трех марок полиэтилентерефталата: ПЭТФ бутылочного; ПЭТФ FF; ПЭТФ ВВ. На данных графиках прослеживается прямая зависимость  $C_{\text{COOH}}^{\text{п}}$  от КЧ.

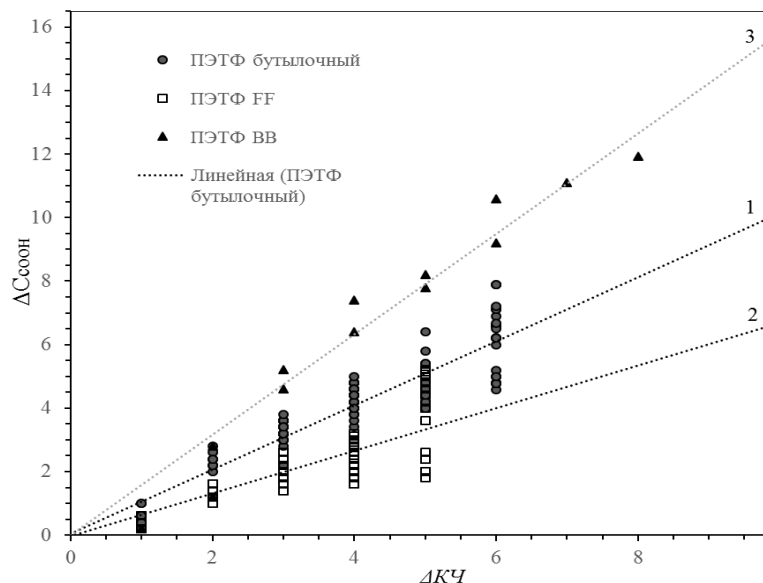


Рис. 2. Сравнительная зависимость изменения карбоксильных концевых групп ( $\Delta C_{\text{COOH}}^{\text{п}}$ ) от изменения КЧ ( $\Delta KЧ$ ) для ПЭТФ бутылочного; ПЭТФ FF; ПЭТФ ВВ

Для всех исследуемых марок ПЭТФ наблюдается прямая линейная зависимость концентрации карбоксильных групп  $C_{\text{COOH}}^{\text{п}}$  от КЧ. Причем выраженность зависимости растет от ПЭТФ FF к ПЭТФ бутылочному и ПЭТФ ВВ. Так, тангенс угла наклона прямой, полученной усреднением данных, для ПЭТФ бутылочного составил 1,01; ПЭТФ FF – 0,62; ПЭТФ ВВ – 1,58.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы были определены зависимости содержания карбоксильных групп в полиэфире от основного параметра процесса поликонденсации – КЧ. Кроме того, было показано, что характер зависимости несколько различается для разных марок ПЭТФ. Полученные результаты позволят операторам технологических установок оптимально управлять процессом синтеза ПЭТФ и контролировать качество конечного продукта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев А.Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе. Л.: Химия, 1966. 768 с.
2. Урманцев У.Р., Грудников И.Б., Табаев Б.В., Лакеев С.Н., Давыдова О.В. Химия и технология производства полиэтилентерефталата: учебное пособие. СПб.: Недра, 2016. 156 с.
3. Борова В.Ю. Побочные реакции, протекающие при синтезе и переработке полиэтилентерефталата // *Вестник науки*. № 6 (75). Т. 1. 2019. С. 139–140.

4. Калюкова Е.И. Титриметрические методы анализа: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2008. 109 с.
5. Федоровский Н.Н., Якубович Л.М., Марахова А.И. Фотометрические методы анализа: учебное пособие. М.: Флинта, 2024. 72 с.
6. Федоров Ю.В., Федорова О.А., Панченко П.А. Современные фотометрические методы анализа органических веществ. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. 36 с.
7. АО «Сибур-ПЭТФ». Полиэтилентерефталат FF (гранулят): технические условия. Тверь, 2020. 29 с.
8. АО «Сибур-ПЭТФ». Полиэтилентерефталат (гранулят): технические условия. ТУ 2226-001-55588670-2007. Тверь, 2007. 25 с.
9. АО «Сибур-ПЭТФ». Полиэтилентерефталат ВВ (гранулят): технические условия. ТУ 20.16.40-011-55588670-2018. Тверь, 2018. 26 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*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  
*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  
*КОВАЛЕВ Алексей Геннадьевич* – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.  
*НИКОЛАЕВ Антон Васильевич* – главный технолог АО «Сибур-ПЭТФ», 170100, Россия, г. Тверь, Московское ш., д. 20X. E-mail: info@tver.sibur.ru

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Старовойтова Н.Ю., Пичугина А.И., Ковалев А.Г., Николаев А.В. Исследование зависимости содержания кислотных групп в полиэтилентерефталате от параметров процесса промышленного синтеза полимера // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 4 (24). С. 95–100.

---

## INVESTIGATION OF THE POLYETHYLENE TEREPHTHALATE ACID GROUPS CONTENT IN DEPENDENCE OF INDUSTRIAL SYNTHESIS PARAMETERS

*N. Yu. Starovoitova<sup>1</sup>, A. I. Pichugina<sup>1</sup>, A. G. Kovalev<sup>1</sup>, A. V. Nicolaev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Tver State Technical University (Tver)*

<sup>2</sup>*JSC «Sibur-PETF» (Tver)*

**Abstract.** In the present work the influence of physical parameters of polyethylene terephthalate polycondensation process on carboxyl (acid) number was investigated. The data were obtained by photometric titration method. The dependences of the concentration of carboxyl groups in the polymer on the acid number measured during the synthesis of polyethylene terephthalate, as well as the nature of the dependences of these characteristics on some physical parameters of the process (pressure, temperature, volume of the reaction mixture) have been

revealed. The obtained results will help operators of technological installations to control the synthesis process rationally and optimally.

**Keywords:** polyesters, polycondensation, polyethylene terephthalate, photometric titration.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*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

*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

*KOVALEV Alexey Gennadievich* – Undergraduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

*NICOLAEV Anton Vasilyevich* – Chief Technologist, JSC «Sibur-PETF», 20X, Moskovskoe shosse, Tver, 170100, Russia. E-mail: info@tver.sibur.ru

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Starovoitova N.Yu., Pichugina A.I., Kovalev A.G., Nicolaev A.V. Investigation of the polyethylene terephthalate acid groups content in dependence of industrial synthesis parameters // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 95–100.

УДК 66.092

#### МЕТОД УТИЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ

*К.В. Чалов, Е.И. Лагусева, Ю.В. Луговой, В.Ю. Долуда*  
*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Чалов К.В., Лагусева Е.И.,  
Луговой Ю.В., Долуда В.Ю., 2024

**Аннотация.** В работе представлены методы утилизации и переработки полимерных отходов. Рассмотрены способы утилизации шитых (отвержденных) полимерных отходов, которые не подвергаются вторичной переработке. Показаны основные направления исследований процесса утилизации отходов: химические и термические. Проведено сравнение термической устойчивости полиэтилена высокого давления и шитого полиэтилена. Процесс термодеструкции изучен на термовесах NETZSCH TG 209 F1; определена температурная область деструкции полиэтилена (ПЭВД) и шитого полиэтилена (PE-Ха).

**Ключевые слова:** утилизация, шитые полимеры, переработка, термодеструкция, пиролиз.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-100-106

### **ВВЕДЕНИЕ**

Сегодня пластиковые изделия применяются человечеством во всех сферах, поэтому невозможно представить развитие современного общества без использования пластиковых материалов. Мировой выпуск полимерных материалов значительно увеличился в последнее десятилетие. Согласно имеющимся данным, мировое производство пластика возросло почти на 70 млн т (с 299 млн в 2012 году до 367 млн в 2020 году) [1]. Тем не менее все пластиковые изделия в конечном итоге становятся отходами [2].

Пластиковые отходы являются одним из основных компонентов муниципальных отходов в городах Европы и России (наряду с органическими и бумажными). Пластик – это опасный загрязнитель, поскольку он включает токсичные компоненты и не поддается биологическому разложению. Пластиковые отходы, складываемые на полигонах твердых бытовых отходов (ТБО), медленно разлагаются под действием солнечной радиации, что приводит к загрязнению почв, водных и воздушных бассейнов. Пластик также встраивается в пищевую цепочку, влияя на окружающую среду, животных и людей. Проживание рядом со свалками увеличивает вероятность возникновения проблем со здоровьем (это, например, низкий вес при рождении, врожденные дефекты и некоторые виды рака) [3].

Пластиковые отходы накапливаются в городских канализационных системах и приводят к закупорке дренажа. Кроме того, они могут выступать в качестве питательной среды для насекомых, вызывающих инфекционные заболевания [4].

Влияние пластикового загрязнения ощущается в совершенно разных странах. По некоторым оценкам, не более 9 % всех когда-либо произведенных пластиковых отходов было переработано, а 79 % отходов оказывается на свалках, отвалах или в окружающей среде [2]. Твердые бытовые отходы содержат большой процент пластиковых отходов с типичным составом: полиэтилентерефталат – 10 %; полиэтилен высокой плотности – 19 %; поливинилхлорид – 6 %; полиэтилен низкой плотности – 23 %; полипропилен – 14 %; полистирол – 9 % [5].

Утилизация и разложение пластика – это важнейшая задача, поэтому ведутся исследования для поиска соответствующих решений. В настоящее время методы утилизации пластиковых отходов путем захоронения на свалках и сжигания совместно с ТБО практикуются не только в России, но и в европейских странах. Однако оба данных метода оказывают негативное воздействие на окружающую среду и в конечном итоге считаются нерациональными [6]. В последние годы внимание исследователей переключилось на рекуперацию энергии из пластиковых отходов. За счет данного процесса не только решается проблема управления пластиковыми отходами, но и генерируется энергия как продукт. В результате требуется простая, эффективная и недорогая технология для решения проблемы загрязнения пластиковыми отходами и преобразования их в полезные энергетические продукты.

Понимание названной проблемы привело к разработке следующих способов: биологического разложения, химической и термической переработки, включающей химическую деполимеризацию, газификацию, пиролиз и каталитическую деградацию [7–9]. Получаемые продукты часто сильно различаются в зависимости от параметров процесса утилизации пластиковых отходов [10, 11].

В последнее время возрастают объемы производства сшитого полиэтилена, используемого для различных сфер народного хозяйства. Сшитые полимеры обладают рядом преимуществ: высокими электроизоляционными свойствами, термостойкостью, стабильностью размеров и устойчивостью к растрескиванию при воздействии окружающей среды [12]. Однако высокие эксплуатационные свойства данного материала приводят к значительным трудностям утилизации отходов его производства и потребления.

Перспективным методом удовлетворения энергетических потребностей промышленного, транспортного и сельскохозяйственного секторов, а также управления твердыми отходами является термохимическая конверсия смешанных пластиковых отходов в топливо.

Процесс пиролиза позволяет проводить термохимическое разложение при высокой температуре пластиковых отходов в инертной атмосфере (азот), которая удаляет кислород из зоны реакции. Следовательно, можно преобразовать пластик в жидкие масла (короткоцепочечные углеводороды) аналогично обычным видам топлива (бензину и дизелю), твердые углеродсодержащие вещества и углеводородные газы (изомеры  $C_1-C_5$ ). Такие факторы, как скорость нагрева, тип пластика, тип реактора и наличие катализаторов, влияют на качество продуктов пиролиза [13].

Пиролиз полиолефинов для производства жидких углеводородов как способ рекуперации энергии и сокращения отходов привлек внимание многих исследователей в последние годы [14–16]. Было проведено большое количество исследований для определения условий, которые обеспечивают наибольший выход ценных продуктов. Однако опубликованных работ, посвященных исследованию методов утилизации или переработки сшитого полиэтилена, имеется значительно меньше.

Деградация пластиковых отходов на основе метода пиролиза очень важна, поскольку это наиболее экономически выгодный и устойчивый процесс производства жидких углеводородов. Настоящая работа посвящена исследованию процесса термодеструкции полимерных отходов, включая сшитые, методом термогравиметрии.

### **МЕТОДЫ, МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ**

Процесс разложения исследовался на термовесах NETZSCH TG 209 F1 со скоростью нагрева  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ . В качестве исходного сырья использовалась полиэтиленовая пленка сельскохозяйственного назначения (полиэтилен высокого давления (ПЭВД) марки СТ 10604-007), а также трубы из сшитого полиэтилена (марка РЕ).

Термогравиметрический анализ проводился при следующих условиях: нагрев образца – с  $35$  до  $600\text{ }^\circ\text{C}$ , затем выдержка –  $15$  мин при  $600\text{ }^\circ\text{C}$ . Процесс проходил в инертной среде (скорость подачи аргона –  $40\text{ мл}/\text{мин}$ ). Масса образцов составляла не более  $10\text{ мг}$ . Материал тигля для анализа – алюминий.

Обработка экспериментальных данных термогравиметрии проводилась с использованием программного обеспечения «NETZSCH Proteus 6.1».

### **РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ**

На рис. 1 и 2 представлены результаты термогравиметрического анализа образцов полиэтилена ПЭВД и сшитого полиэтилена. Процесс термического разложения обоих образцов имеет схожий механизм, так как профили кривых потери массы (ТГ) и их производных (ДТГ) схожи. Сшитый полиэтилен обладает более высокой термостойкостью

в сравнении с ПЭВД. Температура плавления шитого полимера на 20 °С выше (кривые с-ДТА).

Основная потеря массы исследуемых образцов наблюдалась в диапазоне 400–470 °С (кривые ТГ). Образцы разлагались практически полностью, масса летучих продуктов составляла 99 %.

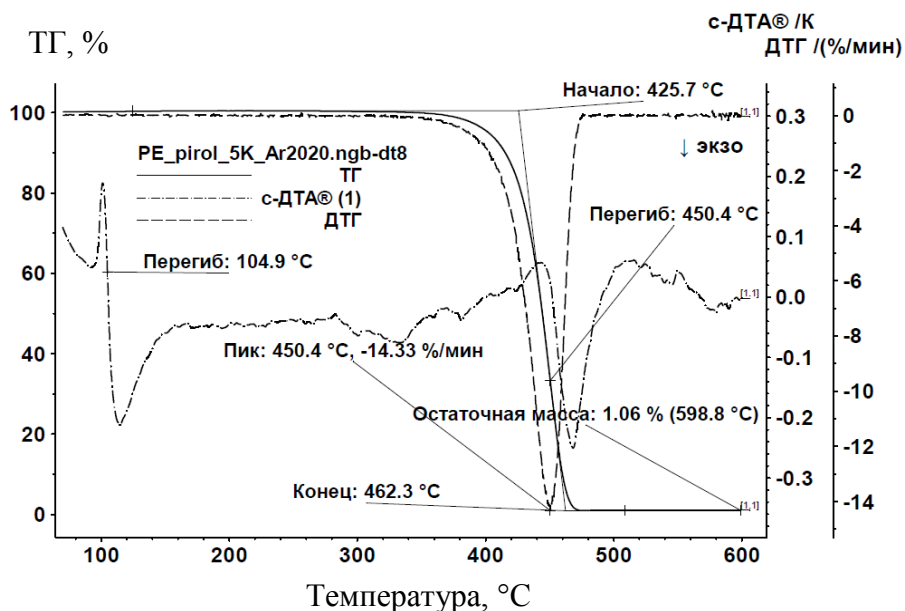


Рис. 1. Зависимость потери массы образца полиэтилена (ПЭВД) от температуры

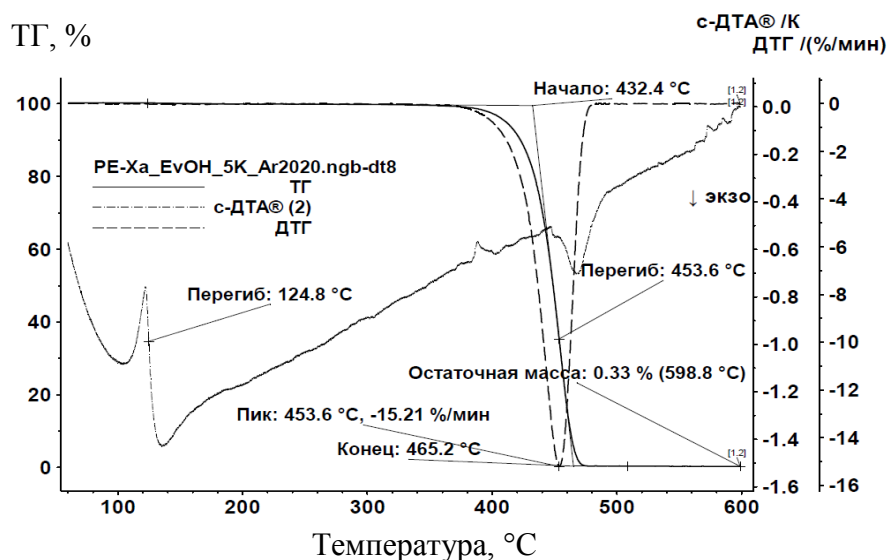
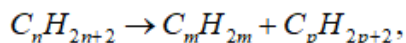


Рис. 2. Зависимость потери массы образца шитого полиэтилена (PE-Xa) от температуры

В процессе деструкции полимеров протекают первичные реакции разрыва цепи макромолекулы, а также вторичные реакции изомеризации, циклизации, конденсации и др. Механизм этих реакций может иметь радикальный характер, так как процесс деструкции проводился в инертной среде, т.е. с минимальным содержанием кислорода в зоне реакции:



где  $n = m + p$ .

Минимальное образование твердого продукта (менее 1 %) в процессе разложения может свидетельствовать об отсутствии реакций смоло- и коксообразования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов необходимо сделать вывод, что полимерные отходы из сшитого полиэтилена могут быть эффективно переработаны методом пиролиза с получением газообразных и жидких углеводородов. Продукты пиролиза следует использовать для рекуперации тепла, затрачиваемого на процесс, или получения химических веществ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zeddy C. Mibei, Anil Kumar, Stephen M. Talai. Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste to Liquid Fuel Using Local Clay Catalyst // *Journal of Energy*. 2023, No. 2, pp 1–11.
2. Pundhir S., Gagneja A. Conversion of Plastic to Hydrocarbon // *International Journal of Advances in Chemical Engineering & Biological Sciences*. 2016. No. 3 (1), pp. 3–6.
3. Wan H.M. Waste Plastics into Fuel Oil // *Institute of Science in Society*. 2015. No. 2 (8), pp. 252–257.
4. Suleman R., Amjad A., Ismail A., Javed S., Ghafoor U., Fahad S. Impact of Plastic Bags Usage in Food Commodities: an Irreversible Loss to Environment // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. No. 29 (80), pp. 49483–49489.
5. Bodzay B., Bánhegyi G. Polymer Waste: Controlled Breakdown or Recycling // *International Journal of Design Sciences and Technology*. 2016. Vol. 22. No. 2, pp. 109–138.
6. Denison R.A. Environmental Life-cycle Comparisons of Recycling, Landfilling, and Incineration: A Review of Recent Studies // *Annual Review on Energy and Environment*. 1996. No. 21, pp. 191–237.
7. Panda A.K., Singh R.K., Mishra D.K. Thermolysis of Waste Plastics to Liquid Fuel: a Suitable Method for Plastic Waste Management and Manufacture of Value Added Products – a World Prospective // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14. No. 1, pp. 233–248.
8. Tukker A. Plastics Waste – Feedstock Recycling, Chemical Recycling and Incineration // *Rapra Review Reports*. Vol. 13. No. 4. 2002. 122 p.
9. Wołosiewicz-głąb M., Pięta P., Sas S., Grabowski Ł. Plastic Waste Depolymerization as a Source of Energetic Heating Oils // *E3S Web of Conferences*. 2017. No. 14 (7), pp. 02044.
10. Motevasel M., Roozbehani B., Shahi A. Catalytic Degradation of Mixed Polymers into Environmental Friendly and Useful Products // *American Journal of Oil and Chemical Technologies*. 2014. No. 2 (12), pp. 360–367.



11. Olufemi A.S., Olagboye S.A. Thermal Conversion of Waste Plastics into Fuel Oil // *International Journal of Petrochemical Science & Engineering Research*. 2017. No. 2 (8), pp. 252–257.
12. Sun F., Bai S., Wang Q. Structures and Properties of Waste Silicone Cross-linked Polyethylene De-cross-linked Selectively by Solid-state Shear Mechanochemical Technology // *Journal of Vinyl and Additive Technology*. 2019. No. 25, pp. 149–158.
13. Anuar Sharuddin S.D., Abnisa F., Wan Daud W.M.A, Aroua M.K. A review on Pyrolysis of Plastic Wastes // *Energy Conversion and Management*. 2016. No. 115, pp. 308–326.
14. Kositkanawuth K., Sattler M.L., Dennis B. Pyrolysis of Macroalgae and Polystyrene: a Review // *Current Sustainable Renewable Energy*. 2014. Vol. 1. No. 4, pp. 121–128.
15. Synergistic Effects of Catalytic Co-Pyrolysis of Macroalgae with Waste Plastics / S. Xu [et al.] // *Process Safety and Environmental Protection*. 2020. Vol. 137, pp. 34–48.
16. Bezergianni S., Dimitriadis A., Fausson G., Karonis D. Alternative Diesel from Waste Plastics // *Energies*. 2017. No. 10 (11), pp. 1750.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*ЧАЛОВ Кирилл Вячеславович* – 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: tschalov\_k@mail.ru

*ЛУГОВОЙ Юрий Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: pn-just@yandex.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

*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

Чалов К.В., Лагусева Е.И., Луговой Ю.В., Долуда В.Ю. Метод утилизации полимерных отходов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 4 (24). С. 100–106.

**METHOD OF POLYMER WASTE DISPOSAL**

*K.V. Chalov, E.I. Laguseva, Yu.V. Lugovoy, V.Yu. Doluda*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The paper presents methods of utilization and recycling of polymer waste. The methods of utilization of cross-linked (cured) polymer waste, which are not subject to recycling, are considered. The main directions of research of waste utilization process are shown: chemical and thermal. The comparison of thermal stability of high-pressure polyethylene and cross-linked polyethylene is carried out. The process of thermal destruction is studied on NETZSCH TG 209 F1 thermo scale; the temperature range of polyethylene (LDPE) and cross-linked polyethylene (PE-Xa) destruction is determined.

**Keywords:** recycling, cross-linked polymers, processing, thermal destruction, pyrolysis.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*CHALOV Kirill Vyacheslavovich* – PhD, Associate Professor, Department of Chemistry and Technology of Polymers, Tver State Technical University, Tver. E-mail: tschalov\_k@mail.ru

*LUGOVOI Yuri Vladimirovich* – Candidate of Technical 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: pn-just@yandex.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: laguseva@yandex.ru

*DOLUDA Valentin Yuryevich* – Doctor of Chemistry, 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**

Chalov K.V., Laguseva E.I., Lugovoy Yu.V., Doluda V.Yu. Method of polymer waste disposal // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 100–106.

**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 универси-  
тета, г. Блумингтон, США

Ковалев К.Л. – д.т.н., профессор МАИ

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

Корнеев К.Б. – к.т.н., доцент ТвГТУ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Сильман 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 (24), 2024

Редактор С.В. Борисов

Корректоры: С.В. Зорикова, Ю.Ф. Воробьева

---

Подписано в печать 25.12.2024

Дата выхода в свет 28.12.2024

Формат 60 x 84 1/8

Физ. печ. л. 13,5

Тираж 500 экз.

Цена свободная

Усл. печ. л. 12,56

Заказ № 52281

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 11,75

С – 108

---

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