

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

№ 2 (18), 2023

Тверь 2023

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственной технический университет, 2023. № 2 (18). 98 с.

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

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

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

ISSN 2686-794X (онлайн)

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Белов В.В.</i> Биоконпозиты строительного назначения с использованием отходов деревообработки. Часть 2 (экспериментальные исследования биоферментации древесного заполнителя).....	5
<i>Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Микаелян Х.А., Петропавловский К.С.</i> Золоцементные композиции.....	12
<i>Курятников Ю.Ю.</i> О некоторых проблемах эксплуатации пассажирских платформ	21
<i>Трофимов В.И.</i> Высокотехнологичные стеновые и вентиляционные блоки с несущим трубчатым каркасом.....	27

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Качановский Ф.В.</i> Электропроводность осадков, выпавших в Твери в 2016–2022 гг.....	36
<i>Макаров А.Н.</i> Математические доказательства законов квантового теплового излучения газовых объемов. Часть I. Законы квантового теплового излучения цилиндрических газовых объемов.....	44
<i>Никуленко Д.А., Араратьян Л.С., Крупнов А.В.</i> Проблема гололедообразования на проводах воздушных линий электропередачи и методы борьбы с ним.....	55
<i>Шум Ал.А., Ветошкин А.М.</i> О центрах симметрии выпуклого пространственного тела.....	64

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Бокова М.Е., Данилов Д.В., Дужий П.А., Небратенко Д.Ю.</i> Особенности использования адгезионных добавок «АМДОР» для модификации битумных вяжущих	73
<i>Кульков С.А., Савич А.В.</i> Инъекционные полиуретановые составы для промышленной гидроизоляции: подбор материалов-аналогов в условиях импортозамещения.....	85

CONTENTS

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<i>Belov V.V.</i> Construction biocomposites using woodworking waste. Part 2 (experimental studies biofermentation of wood aggregate).....	5
<i>Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Mikaelyan Kh.A., Petropavlovskii K.S.</i> Ash cement compositions.....	12
<i>Kuryatnikov Yu.Yu.</i> About some problems of passenger platform operation...	21
<i>Trofimov V.I.</i> High-tech wall and ventilation units with a supporting tubular frame	27

ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Kachanovsky F.V.</i> Influence of meteorological conditions upon the electrical conductivity of the precipitation in Tver during 2016–2022 years.....	36
<i>Makarov A.N.</i> Mathematical evidence of the laws of quantum thermal radiation of gas volumes. Part I. Laws of quantum thermal radiation of cylindrical gas volumes.....	44
<i>Nikulenko D.A., Araratyan L.S., Krupnov A.V.</i> The problem of ice formation on overhead power lines wires and methods of combating it	55
<i>Shum Al.A., Vetoshkin A.M.</i> On the centers of symmetry of a convex spatial body	64

CHEMICAL TECHNOLOGY

<i>Bokova M.E., Danilov D.V., Duzhiy P.A., Nebratenko D.Yu.</i> Features of the use of adhesive additives AMDOR for the modification of bitumen binders.....	73
<i>Kulkov S.A., Savich A.V.</i> Injectable polyurethane compounds for industrial waterproofing: classification table of substitute materials in conditions of import substitution	85

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.11

БИОКОМПОЗИТЫ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБОТКИ. ЧАСТЬ 2 (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОФЕРМЕНТАЦИИ ДРЕВЕСНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ)

В.В. Белов*Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Белов В.В., 2023

Аннотация. Изучены способы биоферментации древесного заполнителя с целью его использования в качестве заполнителя для легких бетонов и других строительных материалов. Указано, что такая обработка древесного сырья может позволить получить строительные материалы, удовлетворяющие требованиям стандарта (даже на основе широко распространенных отходов деревообработки – опилок). Биоремедиация опилок по разработанному способу значительно (в два раза и более) снижает содержание в них сахаров, что способствует получению образцов опилкобетона с плотностью, соответствующей плотности легких бетонов, и с достаточной прочностью на сжатие. Отмечено, что получены опытные образцы биологически активированного древесного заполнителя и определены его основные физико-химические свойства.

Ключевые слова: отходы деревообработки, древесный заполнитель, биоферментация, свойства.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-2-5-12

ВВЕДЕНИЕ

Наши предварительные исследования по теме [1–5]¹ позволили установить возможность улучшения древесного заполнителя путем его биоферментации с помощью микроорганизмов, содержащихся в субстрате животного происхождения – отходе животноводства. Такая обработка древесного сырья может обеспечить получение строительных материалов, удовлетворяющих требованиям стандарта (даже на основе широко распространенных отходов деревообработки – опилок).

В части 1 настоящей работы [6] на основе изучения литературы установлено, что технологии получения древесных композиционных материалов на основе химически и механически активированного древесного заполнителя достаточно сложны и не позволяют получить материалы с высокими строительно-техническими свойствами. Выход из сложившейся ситуации видится в применении новых методов предварительной обработки

¹ В экспериментах по данной теме активное участие принимала Н.Н. Куделя (на тот момент заведующая лабораторией кафедры «Производство строительных изделий и конструкций» Тверского государственного технического университета).

древесного и другого растительного сырья, дающих возможность экономить энергоноситель и исходное сырье, улучшить физико-механические и санитарно-гигиенические свойства материалов, избежать использования дефицитных и в некоторых случаях вредных химических веществ.

Показано, что с современных позиций наиболее перспективным методом предварительной обработки древесного сырья является биологическая обработка, что связано с уникальной способностью биологических систем распознавать определенные химические соединения и осуществлять широкий спектр химических реакций в мягких условиях.

Цель данной научно-исследовательской работы – разработка оптимальных режимов биоферментации древесного заполнителя с целью его использования в качестве заполнителя для легких бетонов и других строительных материалов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве древесного заполнителя древесно-цементной композиции использовались опилки древесины хвойных пород. Влажность и гранулометрический состав опилок определялись по стандартным методикам.

Влажность опилок составляла 8,5 %. Насыпная плотность 90 г/дм³. Гранулометрический состав опилок приведен ниже:

Остатки в процентах на ситах с размером ячейки, мм						Прошло через сито 0,14 мм
5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
25	42,5	7,5	10	10	5	1

Анализ на содержание водорастворимых редуцирующих веществ в опилках производился в соответствии с ГОСТ 19222 методом восстановления сахарами основной соли двухвалентной меди до ее закиси. Содержание сахара находили по количеству перманганата калия, пошедшего на титрование двухвалентного железа закисью меди.

Из опилок отбирали среднюю пробу, после чего ее подвергали испытаниям. Количество редуцирующих веществ в древесине РВ в процентах от сухой навески определяли по формуле

$$РВ = \frac{b \cdot V_0 \cdot 100}{V_1 \cdot g},$$

где b – количество сахара, соответствующее объему перманганата калия, пошедшего на титрование пробы, найденное по таблице из ГОСТ 19222, мг; V_0 – объем воды, использованный для приготовления водной вытяжки, мл; V_1 – объем водной вытяжки, взятой для анализа, мл; g – навеска сухой древесины, мг.

Результаты анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты определения водорастворимых редуцирующих веществ в опилках

Наименование показателей	Значения
Масса влажной навески, г	2,0000
Масса навески в пересчете на сухое вещество, г	1,7621
Объем титра перманганата калия, мл	2,6
Количество сахара, соответствующее титру, мг	8
Содержание водорастворимых редуцирующих веществ, %	0,7306

Методика биоферментации древесного заполнителя

Снижение содержания водорастворимых редуцирующих веществ в опилках требует применения специальных мер, к наиболее эффективным из которых следует отнести биологические преобразования древесного заполнителя, осуществляемые в процессе его ферментации, с помощью микроорганизмов.

Процесс биоферментации опилок в смеси с субстратом животного происхождения реализовывался в специальном биореакторе, в качестве которого была использована лабораторная пропарочная камера с полезным объемом 50 дм³. В камеру устанавливалась емкость из нержавеющей стали, в которую помещалось обрабатываемое сырье. На крышке биореактора имеется отверстие для термометра. Отверстие расположено с таким расчетом, чтобы термометр регистрировал среднюю температуру по всему объему смеси.

Для процесса биоферментации готовили смесь из опилок и субстрата животного происхождения. Например, для получения смеси объемом 30 дм³, которая на 60 % (мас.) состоит из опилок и на 40 % (мас.) – из субстрата, брали соответственно 3,6 кг опилок и 2,4 кг субстрата. Компоненты тщательно перемешивали, затем добавляли воду, смесь снова перемешивали, после чего загружали в биореактор. Затем настраивали необходимую температуру реактора и проводили обработку сырья. Для снабжения микроорганизмов воздухом один раз в сутки в течение всего процесса биоферментации производили перемешивание смеси вручную в течение 10 мин.

В ходе экспериментов по биоферментации растительного сырья необходимо постоянство температуры смеси. Для этого использовали термометр и датчик температуры, входившие в комплект пропарочной камеры. Температура поддерживалась с отклонением от заданной на не более чем 1 °С. Процесс биоферментации производился при заданной температуре (в диапазоне от 36 до 45 °С).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты по изучению влияния продолжительности биоферментации на содержание редуцирующих веществ в обработанных опилках проводились на двух составах сырьевой смеси: 62,5 % опилок в пересчете на сухое вещество и 37,5 % субстрата животного происхождения (I состав) и 50 % опилок и 50 % субстрата (II состав). Содержание воды было выбрано соответственно 52 % и 35 % от массы смеси. Дозирование опилок и воды в замесах производилось с учетом фактической влажности опилок по формулам:

$$P_{\text{вл. оп}} = P_{\text{сух. оп}} \cdot \left(1 + \frac{W}{100}\right);$$

$$P_{\text{в}} = B - \frac{P_{\text{сух. оп}} \cdot W}{100},$$

где $P_{\text{вл. оп}}$ и $P_{\text{сух. оп}}$ – расходы соответственно влажных и сухих опилок, кг; $P_{\text{в}}$ и B – соответственно фактический и номинальный расходы воды, л; W – влажность опилок, %.

Составы обрабатывались параллельно в двух емкостях в одном биореакторе при температуре 42 °С. Через 2, 3, 4 и 5 сут после начала обработки отбирали пробы сырья, для которых определяли влажность, содержание редуцирующих веществ, насыпную плотность.

Результаты испытаний приведены в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 2

Результаты определения влияния продолжительности биоферментации на содержание редуцирующих веществ в обработанных опилках и на их насыпную плотность

Номер состава	Продолжительность обработки, сут	Содержание редуцирующих веществ, %	Насыпная плотность, кг/м ³
I	2	0,535	470
	3	0,446	520
	4	0,412	500
	5	0,365	580
II	2	0,521	510
	3	0,427	510
	4	0,407	530
	5	0,355	580

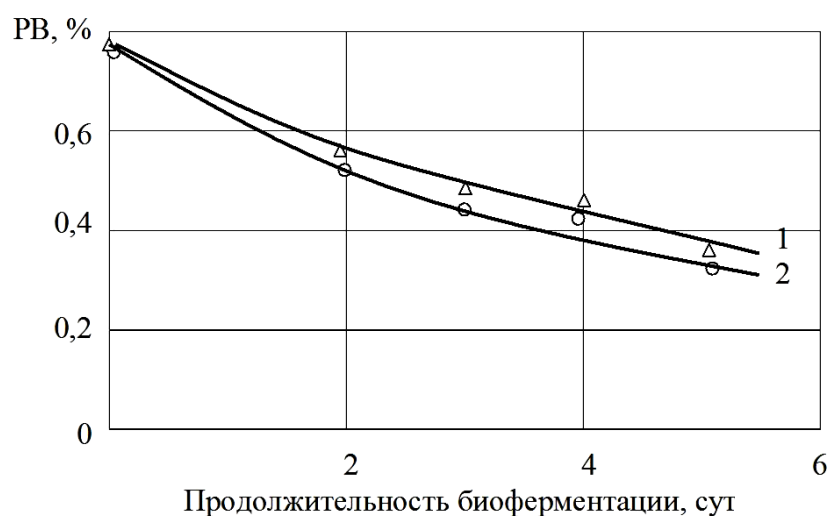


Рис. 1. Содержание редуцирующих веществ в обработанных опилках в зависимости от продолжительности биоферментации: 1 – I состав; 2 – II состав

Результаты экспериментов показывают, что с увеличением продолжительности биоферментации содержание редуцирующих веществ в обработанных опилках заметно снижается. В то же время динамика этого снижения уменьшается при продолжительности биоферментации около 5 сут. Таким образом, технически и экономически целесообразно установить продолжительность биоферментации не более 5 сут, а именно от 4 до 5 сут в зависимости от требований реального производства. Увеличение продолжительности биоферментации в указанных пределах позволяет снизить содержание редуцирующих веществ в обработанных опилках примерно на 10 %, однако удлиняется производственный цикл.

Результаты испытаний (см. табл. 2) свидетельствуют также, что с увеличением продолжительности биоферментации повышается насыпная плотность обработанных опилок, что можно объяснить изменением реологических свойств древесного сырья. Оно становится более податливым, то есть величина пластической деформации у сырья, подвергнувшегося биологическому воздействию, значительно выше, чем у сырья, не испытывавшего это воздействие.

Поскольку содержание редуцирующих веществ в обработанных опилках связано с прочностью опилкобетона, важное значение имеет установление влияния температуры биоферментации на содержание редуцирующих веществ в обработанных опилках с целью их снижения. Результаты исследований данного фактора по испытаниям I состава (рис. 2) позволяют судить об оптимальном значении температуры биоферментации, которая оказалось равной 42 °С.

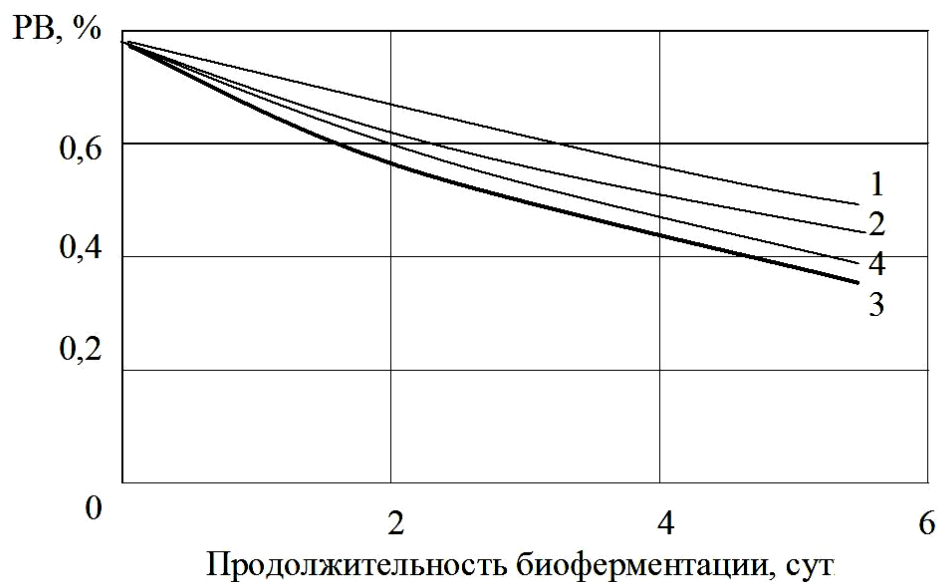


Рис. 2. Содержание редуцирующих веществ в обработанных опилках I состава в зависимости от продолжительности биоферментации при температуре, °С: 1 – 36; 2 – 39; 3 – 42; 4 – 45

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, биоферментация древесного сырья микроорганизмами, содержащимися в навозе и обладающими высокой целлюлозолитической активностью, дает возможность получать продукты со сниженным (по сравнению с исходным субстратом) содержанием углеводов. Содержание сахаров в опилках за счет их биоферментации по разработанной методике возможно уменьшить более чем в два раза (с 0,731 до 0,355 %). Такая обработка древесного сырья может позволить изготавливать строительные материалы, удовлетворяющие требованиям стандарта, даже на основе широко распространенных отходов деревообработки – опилок, а именно опилкобетона с плотностью, соответствующей плотности легких бетонов, и с достаточной прочностью на сжатие. Полученные материалы будут отличаться экологической безопасностью, малой энергоемкостью и стоимостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов В.В., Миронов В.А., Сухарев Ю.В. Биологически активный опилкобетон для сельскохозяйственного строительства // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика*. 2011. № 9. С. 76–82.
2. Белов В.В., Сухарев Ю.В. Использование биологически активированного опилкобетона для утепления эффективной металлодеревянной панели // *Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение*. 2006. № 3. С. 102–106.
3. Миронов В.А., Белов В.В., Сухарев Ю.В. Биологически активированный опилкобетон для утепления эффективной металлодеревянной панели // *Вестник центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук*. 2007. № 6. С. 112–120.
4. Патент РФ 2230049 С2. *Способ получения древесно-цементной композиции* / Миронов В.А., Белов В.В., Сухарев Ю.В.; Заявл. 05.08.2002. Опубл. 10.06.2004.
5. Миронов В.А., Белов В.В., Сухарев Ю.В. Актуальные вопросы биотехнологии в строительстве. *Строительство и архитектура: Сборник научных трудов инженерно-строительного факультета*. Тверь: ТГТУ. 2001. С. 173–175.
6. Белов В.В. Биокompозиты строительного назначения с использованием отходов деревообработки. Часть 1 (обзор) // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 1 (17). С. 14–26.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Производство 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. Биокompозиты строительного назначения с использованием отходов деревообработки. Часть 2 (экспериментальные исследования биоферментации древесного заполнителя) // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 2 (18). С. 5–12.

**CONSTRUCTION BIOCOMPOSITES USING WOODWORKING WASTE.
PART 2 (EXPERIMENTAL STUDIES
BIOFERMENTATION OF WOOD AGGREGATE)****V.V. Belov***Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The methods of biofermentation of wood aggregate for the purpose of its use as a filler for light concrete and other building materials have been studied. It is indicated that such processing of wood raw materials can make it possible to obtain building materials that meet the requirements of the standard (even on the basis of widespread woodworking waste – sawdust). Bioremediation of sawdust according to the developed method significantly (twice or more) reduces the sugar content in them, which contributes to obtaining sawdust concrete samples with a density corresponding to the density of light concrete and with sufficient compressive strength. It is noted that experimental samples of biologically activated wood filler have been obtained, and its basic physico-chemical properties have been determined

Keywords: woodworking waste, wood aggregate, biofermentation, properties.

REFERENCES

1. Belov V.V., Mironov V.A., Sukharev Yu.V. Biologically active sawdust concrete for agricultural construction. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika*. 2011. No. 9, pp. 76–82. (In Russian).
2. Belov V.V., Sukharev Yu.V. The use of biologically activated sawdust concrete for the insulation of an effective metal-wood panel. *Izvestiya OryolGTU. Mashinostroenie. Priborostroenie*. 2006. No. 3, pp. 102–106. (In Russian).
3. Mironov V.A., Belov V.V., Sukharev Yu.V. Biologically activated sawdust concrete for insulating an efficient metal-wood panel. *Vestnik central'nogo regional'nogo otdeleniya Rossijskoj akademii arhitektury i stroitel'nyh nauk*. 2007. No. 6, pp. 112–120. (In Russian).
4. Patent RF 2230049 C2. *Sposob polucheniya drevesno-cementnoj kompozicii* [Method for producing wood-cement composition]. Mironov V.A., Belov V.V., Sukharev Yu.V. Declared 05.08.2002. Published 10.06.2004. (In Russian).
5. Mironov V.A., Belov V.V., Sukharev Yu.V. Topical issues of biotechnology in construction. *Construction and architecture: Collection of scientific works of the Faculty of Civil Engineering*. Tver: TGTU. 2001, pp. 173–175. (In Russian).
6. Belov V.V. Biocomposites for construction purposes using waste wood processing. Part 1 (Overview). *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himicheskie tekhnologii»*. 2023. No. 1 (17), pp. 14–26. (In Russian).

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. Construction biocomposites using woodworking waste. Part 2 (experimental studies biofermentation of wood aggregate) // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 2 (18), pp. 5–12.

УДК 691**ЗОЛОЦЕМЕНТНЫЕ КОМПОЗИЦИИ**

*В.Б. Петропавловская, Т.Б. Новиченкова,
Х.А. Микаелян, К.С. Петропавловский*

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б.,
Микаелян Х.А., Петропавловский К.С., 2023

Аннотация. Приведены результаты исследований влияния выделенного алюмосиликатного компонента золошлакового отхода гидроудаления на свойства цементных смесей. В ходе анализа результатов исследования водопотребности и сроков схватывания указанных смесей с включением алюмосиликатной добавки выявлено, что введение высокодисперсного зольного компонента отражается на свойствах сырьевых смесей на основе портландцемента. Полученные результаты демонстрируют, что использование добавки влечет за собой регулирование свойств вяжущего путем введения дополнительных компонентов, дающих возможность оптимизировать технологические свойства образующихся смесей.

Ключевые слова: портландцемент, золошлаковые отходы, флотация, алюмосиликатная добавка, водопотребность, сроки схватывания.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-2-12-21

В развитых странах производство строительных материалов на основе цементного клинкера ориентировано на увеличение в составе вяжущего доли вторичного минерального сырья [1]. В настоящее время эта тенденция также просматривается применительно к таким крупнотоннажным отходам, как зола-уноса и золошлаковые смеси (ЗШС), образующиеся при сжигании твердого топлива в котлах тепловых электростанций (ТЭС). Необходимость использования ЗШС обосновывается возрастающей опасностью нарушения экологической обстановки вблизи этих производств, а также проблемой утилизации зол. Особенно все это актуально для России, где большая часть электроэнергии вырабатывается ТЭС, сжигающими твердое топливо с образованием многотоннажных объемов зольных отходов [2].

Зола-уноса – это остаток с зернами, чей размер меньше 0,16 мм, образующийся при сгорании топлива и скапливающийся в золоулавливающих устройствах. Золошлаковая смесь гидроудаления имеет гранулометрический состав с более широким распределением частиц по размерам [1]. В зависимости от вида топлива зола подразделяется на

антрацитовую, каменноугольную, буроугольную, сланцевую, торфяную и др. [3, 4]. Каждая из них характеризуется определенной степенью однородности,

Очевидно, что цемент и бетон как наиболее ресурсоемкие строительные материалы способны «поглотить» значительную долю зол-уноса и ЗШС и, следовательно, сберечь мировые энергоресурсы (их потребляемая только цементной промышленностью доля составляет сегодня около 5 %). Эти отходы могут стать ценным компонентом цементных смесей и бетонов, существенно улучшающим технологические и эксплуатационно-технические показатели последних [5, 6].

В последнее время наибольшее распространение в технологиях цемента и бетона получили высококальциевые золы, несмотря на то, что их применение до сих пор связано с определенными трудностями (прежде всего со значительными вариациями их состава и свойств). Еще одним негативным фактором выступает высокое содержание в указанных солях свободного СаО, приводящего к деструкции цементного камня и бетонов [2]. Несмотря на это обогащенные низкокальциевые золошлаковые отходы могут быть эффективно использованы в качестве микронаполнителя, способствующего формированию уплотненной структуры вяжущего.

Из-за высокой стоимости и энергоемкости процесса производства портландцемента целесообразно применять бесклинкерные алюмосиликатные вяжущие, то есть промышленные отходы алюмосиликатного состава, в качестве основного сырьевого компонента для производства строительных материалов. К таким вяжущим, в полной мере способными конкурировать с портландцементом, относятся щелочные и щелочно-земельные вяжущие [5].

Из-за близости химического состава ЗШС к глинам эти смеси могут заменить последние в производстве портландцемента. При этом не требуется расходовать энергию на дегидратацию глинистых минералов. Частицы несгоревшего топлива оказывают положительное влияние при производстве клинкера.

По мнению автора [5], ЗШС могут (независимо от состава) выполнять роль инертного заполнителя в составе минеральных композиций на основе гипса. В производстве гипсобетонов применение ЗШС в этом качестве уменьшает расход вяжущего и отражается на плотности изделий.

Возможно применение зол топливных станций и компонентов ЗШС в составе бетонов и цементных композиций [8, 9]. Зольные алюмосиликатные наполнители, получаемые выделением их из состава ЗШС, как и другие высокодисперсные добавки, позволяют улучшить технологические [10] и эксплуатационные свойства цементных материалов [11, 12] и повысить их коррозионную стойкость. Вовлечение составляющих золошлаковых отходов ТЭС для модификации и повышения эффективности цементных вяжущих – актуальная задача в настоящее время для России и других стран, имеющих значительные объемы подобных отходов.

В целях получения композиционного вяжущего с высокими эксплуатационными свойствами на основе компонентов золошлаковых отходов в работе исследовалось влияние алюмосиликатного компонента на свойства золоцементного вяжущего.

В качестве основного вяжущего применялся портландцемент ExtraCEM 500 – ЦЕМ II/A-И 42.5Б. ExtraCEM 500 – общестроительный портландцемент, производимый по «сухой» технологии. В состав портландцемента введена минеральная добавка – молотый известняк – в количестве до 20 %.

Применяемый портландцемент имеет класс по прочности 42,5, относится к быстротвердеющим (в соответствии с классификацией портландцементов по ГОСТ 31108-2016). Данный цемент характеризуется пределом прочности при сжатии в возрасте 2 сут, равном 26,2 МПа, пределом прочности при изгибе в возрасте 2 сут, составляющем 4,9 МПа, пределом прочности при сжатии в возрасте 28 сут, равном 49,1 МПа, пределом прочности при изгибе в возрасте 28 сут, составляющим 7,6 МПа.

В качестве алюмосиликатной добавки в исследованиях использовался компонент ЗШС угольной ТЭС Московской области (рис. 1), полученный в результате разделения золошлаковых отходов методами флотационного обогащения и магнитной сепарации на отдельные компоненты в заводских условиях.



Рис. 1. Золошлаковая смесь Каширской тепловой электростанции

Основными компонентами, содержащимися в смеси, являются SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , которые в сумме составили 87–96 %. Содержание оксидов кальция и магния варьировалось в пределах 4–8 %. Сумма оксидов K_2O и Na_2O невелика и не превысила 2–3 %. Содержание серы в золе находилось в пределах 0,1–0,16 %. Содержание таких компонентов, как P_2O_5 , MnO , TiO_2 составляло менее 1 %, поэтому они не играли существенной роли при проведении флотации.

Алюмосиликатный компонент (АСК) представляет собой светло-серый порошкообразный материал (рис. 2), содержащий 2–4 % (мас.) углерода. Химический состав АСК приведен ниже:

Оксид	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3	P_2O_5	SO_3	C
	Содержание, %											
Алюмо-силикатный компонент	0,6	1,6	21,5	57,8	2,1	2,3	0,9	0,1	4,6	0,4	0,1	3



Рис. 2. Внешний вид АСК топливной золы

Удельная поверхность добавки $1597,2 \text{ м}^2/\text{кг}$. Средний диаметр частиц $1,8 \text{ мкм}$. Насыпная плотность 900 кг/м^3 . Алумосиликатные частицы представлены стеклофазой и в большинстве своем имеют сферическую форму и не обладают столь развитой пористостью, как частицы углеродного компонента золошлаковых отходов.

Водопотребность цементного теста (рис. 3) определялась по стандартной методике в соответствии с требованиями ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний» с использованием полифракционного песка.



Рис. 3. Определение нормальной густоты цементного теста

В исследованиях содержание АСК изменяли в пределах от 0 до 30 % от массы цемента.

Начало схватывания цементного теста (рис. 5) также находили по стандартной методике на приборе Вика со стальной иглой. Это начало определяли как время от начала затворения цементного порошка жидкой фазой до момента, когда игла при проникновении в тесто не доходила до края пластинки на (4 ± 1) мм в соответствии с требованиями ГОСТ 30744-2001.

На первом этапе исследования изучалось влияние АСК на водопотребность цементного теста. Была получена зависимость водоцементного отношения от содержания АСК топливных золошлаковых отходов. Результаты исследования водопотребности приведены на рис. 4.

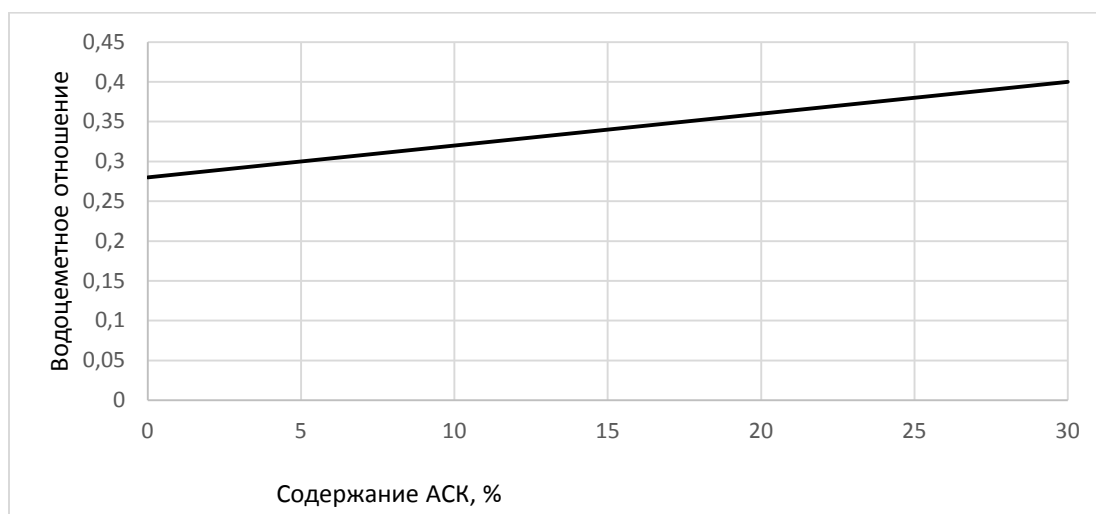


Рис. 4. Влияние содержания АСК ЗШС на водопотребность модифицированного цементного теста



Рис. 5. Определение сроков схватывания цементного теста с добавкой АСК ЗШС

Показано, что с увеличением содержания алюмосиликатного порошка (средний размер частиц в составе полидисперсной смеси 1,8 мкм) увеличивается водопотребность смеси. Водоцементное отношение растет от 0,28 до 0,4 при варьировании количества добавки в пределах 0–30 %.

На втором этапе проводилось исследование влияния АСК топливных золошлаковых отходов на сроки начала (рис. 6) и конца схватывания цементного теста.

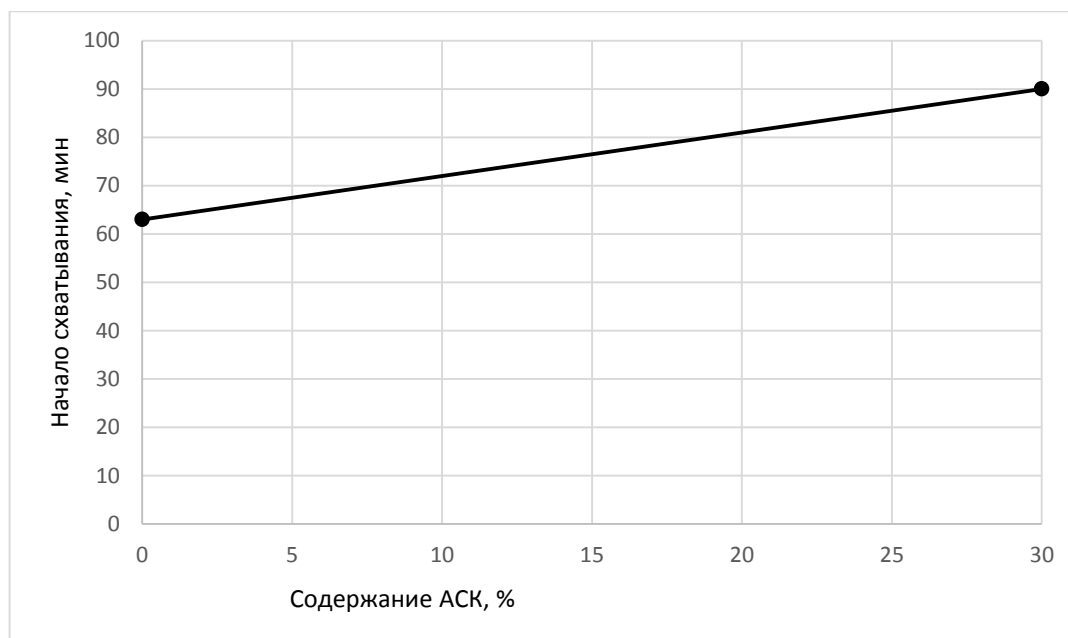


Рис. 6. Влияние содержания АСК ЗШС на начало срока схватывания теста

Установлено, что введение алюмосиликатной добавки отражается на сроках начала (см. рис. 6) и конца схватывания цементного теста. Замедление процесса схватывания теста с алюмосиликатной добавкой, по-видимому, связано прежде всего с изменением щелочности жидкой фазы, что сказывается на схватывании цементного теста и дальнейшем структурообразовании модифицированного цементного камня. Сроки схватывания увеличиваются с возрастанием содержания алюмосиликатной добавки в изученном диапазоне.

Таким образом, введение АСК способствует росту водопотребности цементных смесей, а также регулированию начала и конца схватывания цементного теста. Для эффективного использования алюмосиликатной добавки в составе цементов необходимо дополнительно вводить химические добавки, регулирующие реологические свойства смесей и процессы их схватывания и твердения, что требует проведения дополнительных исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ватин Н.И., Петросов Д.В., Калачев А.И., Лахтинен П. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. № 4. С. 16–21.
2. Fediuk R., Makarova N., Qader D.N., Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Sulman M., Petropavlovskii K. Combined effect on properties and durability performance of nanomodified basalt fiber blended with bottom ash-based cement concrete: ANOVA evaluation // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. No. 23 (11), pp. 2642–2657. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.01.179.
3. Makul N. [et al.] Utilization of biomass to ash: An overview of the potential resources for alternative energy // *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 21, pp. 6482. DOI: 10.3390/ma14216482.
4. Макаренко С.В., Баишев Д.И., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Влияние зол-уноса и золошлаковых смесей ТЭС ОАО «Иркутскэнерго» на свойства цемента // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2014. № 4 (30). С. 278–283.
5. Цырятьева А.В. Зола гидроудаления как компонент геополимеров // *Научно-практические проблемы в области химии и химических технологий: Материалы межрегиональной научно-технической конференции молодых ученых, специалистов и студентов вузов*. Апатиты: ИХТРЭМС КНЦ РАН. 2015. С. 134–138.
6. Салиева М.Г. Некоторые аспекты использования золы гидроудаления в строительной индустрии // *Материаловедение*. 2019. № 2 (30). С. 101–103.
7. Petropavlovskaya V., Sulman M., Novichenkova T., Sidorov A., Petropavlovskii K. Ultra-dispersed ash filler for dispersed binding systems // *Chemical Engineering Transactions*. 2021. Vol. 88, pp. 1003–1008. DOI: 10.3303/CET2188167.
8. Petropavlovskaya V., Sulman M., Novichenkova T., Petropavlovskii K. Corrosion resistant fine-grained ash concrete for repairs of constructions in the linen production // *Journal of Physics*. 2021. Vol. 1926, pp. 012045. DOI: 10.1088/1742-6596/1926/1/012045.
9. Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Aleksandrova O.V., Fischer H.-B. Application of fuel ash as a microfiller in cement dispersion systems // *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1037, pp. 729–736.
10. Aleksandrova O.V., Nguyen Duc Vinh Quang, Bulgakov B.I., Fedosov S.V., Lukanova N.A., Petropavlovskaya V.B. The effect of mineral admixtures and fine aggregates on the characteristics of high-strength fiber-reinforced concrete // *Materials*. 2022. № 15 (24), pp. 8851. DOI: 10.3390/ma15248851.
11. Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Aleksandrova O.V. Application of fuel ash as a microfiller in cement dispersion systems // *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1037, pp. 729–736. DOI:10.4028/www.scientific.net/msf.1037.729
12. Самченко С.В., Егоров Е.С. Управление свойствами цементной пасты при ее модифицировании предварительно гидратированной цементной суспензией // *Техника и технология силикатов*. 2021. Т. 28. № 2. С. 54–58.
13. Altynbekova A.D., Lukpanov R.E., Dyusseminov D.S., Askerbekova A.M., Tkach E.V. Effect of a complex modified additive on the setting time of the cement mixture // *Complex Use of Mineral Resources*. 2023. № 325 (2), pp. 29–38. DOI:10.31643/2023/6445.15.

14. Ткач Е.В., Филимонова Ю.С., Корнеев А.И. Тяжелый бетон на основе полидисперсного вяжущего с комплексным полимерным модификатором с повышенными эксплуатационными показателями // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 2 (100). С. 112–119. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-112-119.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

НОВИЧЕНКОВА Татьяна Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Производство 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

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Микаелян Х.А., Петропавловский К.С. Золоцементные композиции // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 2 (18). С. 12–21.

ASH CEMENT COMPOSITIONS

V.B. Petropavlovskaya, T.B. Novichenkova, Kh.A. Mikaelyan, K.S. Petropavlovskii
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The results of studies of the influence of the isolated aluminosilicate component of the ash and slag waste of hydraulic removal on the properties of cement mixtures are presented. During the analysis of the results of the study of water demand and the setting time of these mixtures with the inclusion of an aluminosilicate additive, it was revealed that the introduction of a highly dispersed ash component affects the properties of raw mixtures based on Portland cement. The results obtained demonstrate that the use of an additive entails the regulation of the properties of the binder by introducing additional components that make it possible to optimize the technological properties of the resulting mixtures.

Keywords: portland cement, ash and slag waste, flotation, aluminosilicate additive, water demand, setting time.

REFERENCES

1. Vatin N.I., Petrosov D.V., Kalachev A.I., Lakhtinen P. Application of ash and ash and slag waste in construction. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*. 2011. No. 4, pp.16–21. (In Russian).
2. Fediuk R., Makarova N., Qader D.N., Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Sulman M., Petropavlovskii K. Combined effect on properties and durability performance of nanomodified basalt fiber blended with bottom ash-based cement concrete: ANOVA evaluation. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. No. 23 (11), pp. 2642–2657. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.01.179.
3. Makul N. [et al.]. Utilization of biomass to ash: An overview of the potential resources for alternative energy // *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 21, pp. 6482. DOI: 10.3390/ma14216482.
4. Makarenko S.V., Baishev D.I., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. Influence of fly ash and ash-slag mixtures of the TPP of OJSC «Irkutskenergo» on cement properties. *Izvestija Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2014. No. 4 (30), pp. 278–283. (In Russian).
5. Tsyratyeva A.V. Hydraulic removal ash as a component of geopolymers. *Scientific and practical problems in the field of chemistry and chemical technologies: Materials of the interregional scientific and technical conference of young scientists, specialists and university students*. Apatity: IHTREMS KNC RAN. 2015, pp. 134–138. (In Russian).
6. Salieva M.G. Some aspects of the use of hydraulic removal ash in the construction industry. *Materialovedenie*. 2019. No. 2 (30), pp. 101–103. (In Russian).
7. Petropavlovskaya V., Sulman M., Novichenkova T., Sidorov A., Petropavlovskii K. Ultra-Dispersed Ash Filler for Dispersed Binding Systems. *Chemical Engineering Transactions*. 2021. Vol. 88, pp. 1003–1008. DOI: 10.3303/CET2188167.
8. Petropavlovskaya V., Sulman M., Novichenkova T., Petropavlovskii K. Corrosion resistant fine-grained ash concrete for repairs of constructions in the linen production. *Journal of Physics*. 2021. Vol. 1926. pp. 012045. DOI: 10.1088/1742-6596/1926/1/012045.
9. Petropavlovskaya V.B. [et al.]. Application of fuel ash as a microfiller in cement dispersion systems. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1037, pp. 729–736.
10. Aleksandrova O.V. [et al.]. The Effect of Mineral Admixtures and Fine Aggregates on the Characteristics of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete. *Materials*. 2022. No. 15, pp. 8851. DOI: 10.3390/ma15248851.
11. Petropavlovskaya V. Application of Fuel Ash as a Microfiller in Cement Dispersion Systems. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1037, pp. 729–736. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1037.729.
12. Samchenko S.V., Egorov E.S. Control of the properties of cement paste during its modification with a pre-hydrated cement suspension. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. 2021. Vol. 28. No. 2, pp. 54–58. (In Russian).
13. Altynbekova A.D., Lukpanov R.E., Dyusseminov D.S., Askerbekova A.M., Tkach E.V. Effect of a complex modified additive on the setting time of the cement mixture. *Complex Use of Mineral Resources*. 2022. No. 325 (2), pp. 29–38. DOI: 10.31643/2023/6445.15.
14. Tkach E.V., Filimonova Y.S., Korneev A.I. Heavy concrete based on polydisperse binder with complex polymer modifier with increased performance indicators. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2022. No. 2 (100), pp. 112–119. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-112-119. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

PETROPAVLOVSKAYA Viktoriya Borisovna – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Materials 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

MIKAELIAN Khachatur Arsenovich – master's student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: dr.d1708@yandex.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

CITATION FOR AN ARTICLE

Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Mikaelyan Kh.A., Petropavlovskii K.S. Ash cement compositions // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 2 (18), pp. 12–21.

УДК 699.88

**О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАССАЖИРСКИХ ПЛАТФОРМ**

Ю.Ю. Курятников

Тверской государственной технической университет (г. Тверь)

© Курятников Ю.Ю., 2023

Аннотация. Проведен анализ проблем, возникающих на этапе строительства, реконструкции или эксплуатации железнодорожных платформ и приводящих к сокращению срока их службы. Предложены пути решения этих проблем, а именно рекомендовано использовать современные заводские строительные изделия с противоскользящим эффектом.

Ключевые слова: пассажирская платформа, противоскользящий эффект, противогололедные реагенты, гидрофобизатор.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-2-21-27

Темп жизни людей с каждым годом все ускоряется. Неотъемлемой частью этого процесса является транспортная инфраструктура, которая повышает мобильность населения. Железные дороги – это одна из важнейших артерий этой системы. В настоящее время, согласно исследованиям Института экономики и развития транспорта, в нашей стране наблюдается увеличение пассажиропотока на основных направлениях. На каждом этапе своего реализуемого по железной дороге путешествия (начиная от

покупки билета и заканчивая выходом из вагона в пункте назначения) человек должен ощущать себя в безопасности, ему должно быть комфортно и удобно.

В настоящее время в целях улучшения качества обслуживания пассажиров на остановочных пунктах железных дорог проводится масштабная работа по реконструкции, капитальному и текущему ремонтам пассажирских платформ. Их оборудуют навесами, пандусами и специальной разметкой для обеспечения доступа маломобильным группам населения, системами светодиодного освещения и визуальной навигации для пассажиров.

При реконструкции и строительстве новых платформ используют современные строительные материалы, изделия заводского изготовления и технологии, благодаря которым значительно увеличиваются сроки эксплуатации объектов. Так, если раньше требовалось часто менять асфальтовое покрытие, обновлять полосу безопасности и следить за состоянием самого фундамента, то новые конструкции служат не менее 10 лет без дополнительного ремонта при правильной эксплуатации. Отличительной особенностью новых платформ является их устройство: на несущие конструкции основания укладываются железобетонные элементы с готовым внешним покрытием. Оно долговечно и удобно для пассажиров, по нему обувь не скользит даже в дождь. Элементы платформ изготавливаются на железобетонных заводах, и прямо там в них устанавливают тактильные указатели (щуч-линии и рифленую плитку). Непосредственно на платформе эти изделия оперативно монтируют, значительно сокращая время на производство работ. Кроме того, подобная технология позволяет собирать платформы даже при низких, отрицательных температурах. Благодаря сборной конструкции можно, если необходимо, легко изменять габаритные параметры платформы (к примеру, сдвигать ее для пропуска путевой техники).

К современным железобетонным изделиям заводского изготовления с описанным покрытием можно отнести железнодорожные плиты с обнаженным крупным заполнителем (рис. 1), краевые балки железнодорожных платформ (рис. 2), угловые элементы платформ (рис. 3). Противоскользкий эффект поверхности достигается за счет применения технологии вскрытия заполнителя бетона.

Безопасность пассажиров, входящих в маломобильные группы населения, достигается за счет наличия на плитах тактильных полос или поверхностей.

Краевые балки железнодорожных платформ – это обычно железобетонное изделие прямоугольного сечения. Они являются несущим конструкционным элементом и используются для обеспечения противоскользкого эффекта на краю пассажирской платформы со стороны железнодорожных путей.

Угловые элементы платформ представляют собой плиту Г-образной формы с бороздами на внутренней поверхности для установки на направляющие и петель для крепления к элементу покрытия при монтаже. Указанные элементы также применяются для создания противоскользкого эффекта на краю пассажирской платформы со стороны железнодорожных путей, но монтируются (в отличие от краевых балок) на существующее основание и позволяют трансформировать платформу с учетом конкретных требований, современных потребностей и запросов без изменения несущей конструкции.



Рис. 1. Железнодорожные плиты с обнаженным крупным заполнителем



Рис. 2. Краевые балки



Рис. 3. Угловые элементы платформ

Зачастую при несоблюдении правил эксплуатации пассажирских платформ строительные изделия и конструкции, которые должны были служить не менее 10 лет без дополнительного ремонта, приходят в негодность через 1–2 года после монтажа. Основные причины такого явления: использование агрессивных противогололедных реагентов в зимний период, механические повреждения изделий при очистке от снега и наледи, пренебрежение методами вторичной защиты изделий после монтажа, невыполнение требований проектной документации при строительстве, несовершенная проектная документация.

В настоящее время выбор противогололедных средств очень широкий. Чаще всего используют хлоридные реагенты, так как они достаточно дешевы, просты в применении и, как считалось, безвредны и экологичны. Некоторыми исследователями [1] были проведены эксперименты, которые доказали, что вышеназванные реагенты разрушают бетон: хлориды за счет капиллярного всасывания проникают в тело бетона и, взаимодействуя с его составляющими, образуют растворимые соли; эти соли, вымываясь, приводят к разрушению бетона (рис. 4).

В качестве коррозионных сред (моделей хлоридных противогололедных реагентов) использовали двух- и трехкомпонентные модели. Первые состояли из хлоридов натрия и кальция, а вторые – из хлорида натрия, хлорида кальция и хлорида магния. Наибольшие разрушения выявлены у образцов бетона, подвергшихся воздействию постоянных отрицательных температур и циклическим испытаниям. Отмечено сильное, почти полное разрушение образцов, извлеченных из двух- и трехкомпонентных моделей (вплоть до мелких песчаных фракций); на поверхности образцов наблюдался белый налет.



Рис. 4. Разрушение бетона под действием противогололедных реагентов

К разрушению пассажирских платформ приводят механические воздействия, возникающие при очистке от снега и наледи указанных конструкций в зимний период (рис. 5). Плиты, краевые балки и угловые элементы допускают механизированную очистку от снега, но запрещается производить такую очистку при помощи машин с металлическими щетками, металлическими скребками, лопатами и ломом (все они могут вызвать повреждение покрытия).

Для борьбы с гололедом можно использовать следующие средства:

природный песок;

гранитную крошку (мелкий гранитный щебень с размером зерен 2–5 мм);

мраморную крошку (мелкий мраморный щебень с размером зерен 2,5–5,0 мм);

гранитную или мраморную крошку в сочетании с песком в пропорции 3:2.



Рис. 5. Сколы на платформе при механических воздействиях

Невыполнение требований (или ошибки) проектной документации при строительстве могут привести к негативным последствиям. На рис. 6 представлена пассажирская платформа, при возведении которой не были соблюдены Требования к конструктивным материалам поверхностей платформ и сходов, введенные в действие Распоряжением ОАО «Российские железные дороги» от 24 декабря 2010 г. № 2705р. В частности, данная платформа не имеет уклона поверхности и допускает скопление воды, что приводит к

образованию наледи в зимний период и физической коррозии при замораживании и оттаивании воды в порах бетона. Уклон поверхности платформ в поперечном направлении следует предусматривать 1:100. Для боковых платформ уклон поверхности должен быть направлен в сторону от железнодорожных путей с устройством водоприемного лотка.



Рис. 6. Скопление воды на платформе

При посадке пассажиров с обеих сторон достаточный уклон платформы и водоотводного лотка нужно предусматривать посередине платформы, при посадке с одной стороны – вдоль ее края. Это обеспечивает эффективный водоотвод и долговечность внешнего покрытия платформы (рис. 7).



Рис. 7. Водоотвод платформы

Пренебрежение методами вторичной защиты элементов платформ также приводит к сокращению срока службы ее внешнего покрытия. Согласно ГОСТ 31384-2017 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические условия»,

СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 (с Изменениями № 1)», Пособию МГСН 2.09-03 «Защита от коррозии бетонных и железобетонных конструкций от коррозии транспортных сооружений», для предотвращения коррозионного разрушения бетонных и железобетонных изделий транспортного строительства в результате воздействия агрессивной среды должна быть обеспечена вторичная защита, которая заключается в обработке поверхности железобетонного изделия гидрофобизирующим составом глубокого проникновения с высокой степенью защиты.

Указанный способ вторичной защиты изделий платформ, например, применялся при проведении ремонта пассажирских платформ на Краснодарском региональном участке Северо-Кавказской дирекции пассажирских обустройств [2]. Механизм действия гидрофобизатора заключается в следующем. Под воздействием атмосферных осадков из верхнего покрытия платформ вымывается $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и поверхность становится пористой, начинает разрушаться. Гидрофобизатор проникает в поры поверхности бетона, не позволяя влаге распространяться внутрь и разрушать его структуру. При нанесении на платформу гидрофобизатора меняется сама структура материала, тем самым останавливают процесс химической коррозии.

Таким образом, применение при строительстве или реконструкции железнодорожных платформ современных заводских изделий, получаемых по технологии, предполагающей использование обнаженного крупного заполнителя (а к конструкциям, которые могут быть изготовлены по указанной технологии, как мы говорили выше, относятся железнодорожные плиты, краевые балки, угловые элементы платформ), и обладающих в силу этого противоскользким эффектом, оправданно, полезно и эффективно. Подчеркнем еще раз, что срок службы таких платформ составит не менее 10 лет, им не потребуются дополнительный ремонт при соблюдении правил эксплуатации и выполнении требований проектной документации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В.Г., Чурюкина С.В., Дусеев Д.И. Механизм разрушения бетонов при воздействии на них хлоридных антигололедных реагентов // *Евразийский союз ученых: науки о земле*. 2016. № 5/26. С. 121–124.
2. Панченко А. Платформа прослужит дольше // *Гудок*. Вып. 172. URL: <https://gudok.ru/zdr/173/?ID=1388219&ysclid=lm51lqrni7759658727> (дата обращения: 29.05.2023).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КУРЯТНИКОВ Юрий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Производство 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. О некоторых проблемах эксплуатации пассажирских платформ // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 2 (18). С. 21–27.

ABOUT SOME PROBLEMS OF PASSENGER PLATFORM OPERATION*Yu.Yu. Kuryatnikov**Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The analysis of problems arising at the stage of construction or reconstruction or during the operation of railway platforms and leading to a reduction in their service life is carried out. The ways of solving these problems are proposed, namely, it is recommended to use modern factory construction products with an anti-slip effect.

Keywords: passenger platform, anti-slip effect, deicing reagents, hydrophobizer.

REFERENCES

1. Popov V.G., Churyukina S.V., Duseev D.I. The mechanism of concrete destruction when exposed to chloride anti-icing reagents. *Evrasijskij soyuz uchenyh: nauki o zemle*. 2016. No. 5/26, pp. 121–124. (In Russian).
2. Panchenko A. The platform will last longer. *Gudok*. Iss. 172. URL: <https://gudok.ru/zdr/173/?ID=1388219&ysclid=lm51lqrni7759658727> (date of access: 29.05.2023). (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KURYATNIKOV Yury Yuryevich – 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: yuriy-k@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kuryatnikov Yu.Yu. About some problems of passenger platform operation // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2021. No. 4 (12), pp. 21–27.

УДК 693.5

**ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЕ СТЕНОВЫЕ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ БЛОКИ
С НЕСУЩИМ ТРУБЧАТЫМ КАРКАСОМ***В.И. Трофимов**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Трофимов В.И., 2023

Аннотация. Рассмотрен вопрос повышения эффективности изготовления и работы под нагрузкой облегченных бетонных изделий с учетом использования пустотообразователей различной формы и реологического состояния смеси. Описаны способы получения многопустотных бетонных изделий в качестве стеновых, предложены способ формирования их многопустотной структуры на основе применения трубчатых каркасов и технология их изготовления.

Ключевые слова: бетон, многопустотные бетонные изделия, трубчатый каркас, реологическое состояние.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-2-27-35

Одним из важных условий повышения качества жилищного и гражданского строительства является создание комфортных условий для жизнедеятельности людей. При этом одним из факторов, негативно влияющих на указанное качество, выступает использование многопустотных стеновых изделий, не отвечающих современным требованиям, предъявляемым к эффективности эксплуатации.

В настоящее время две из самых распространенных, острых проблем, возникающих на этапе возведения сооружения с учетом современных требований, – это недостаточная наружная и межквартирная тепло- и звукоизоляция, слабая вентиляция. Предлагается новое техническое решение, направленное на снижение массы стеновых блоков, улучшение их тепло-, звукоизоляционных и вентиляционных свойств и одновременно обеспечение их повышенной прочности, а также на упрощение технологии их изготовления.

Одним из способов решения проблемы повышения эффективности изготовления и использования тепло- и звукоизоляционных стеновых блоков является использование комплексного подхода, реализуя который совершенствуют конструкции этих блоков и собственно технологию производства. При этом указанные блоки должны отличаться многофункциональностью и повышенной эффективностью [1, 2].

Возможность целенаправленного равномерного распределения максимально закрытых пустот во всем объеме стенового блока возникает за счет оригинального решения по двум вариантам. Первый предполагает использование универсального сборного несущего трубчатого каркаса, собираемого из полимеркомпозитных труб (с горизонтальной ориентацией – для звукоизоляции, с вертикальной – для теплоизоляции и вентиляции (рис. 1–3); горизонтальная ориентация труб, в отличие от вертикальной (характерна для такого музыкального инструмента, как орган), позволяет гораздо лучше гасить звуковую волну)). Второй вариант реализуется через применение дискретных пустотообразователей из отходов производства трубок во всем объеме блока (рис. 4, 5).

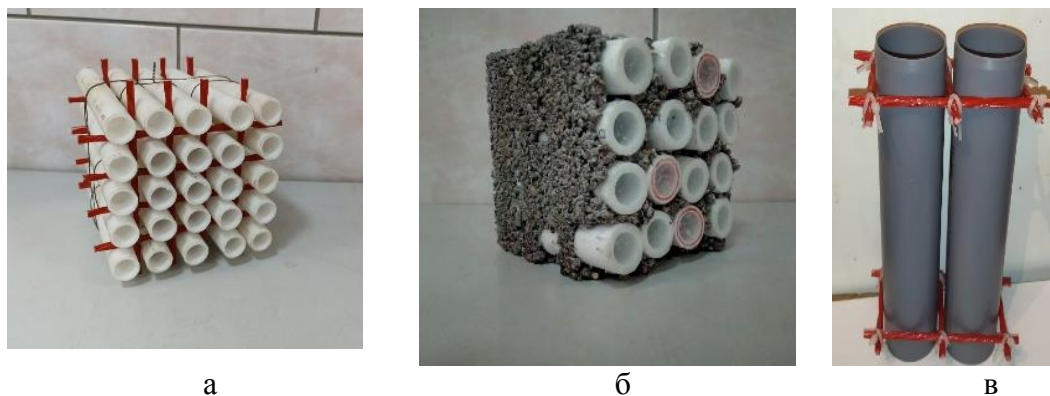


Рис. 1. Моделирование технологии изготовления многопустотных блоков с несущим трубчатым каркасом:
а – сборный трубчатый каркас стенового блока; б – многопустотный бетонный образец после испытания; в – сборный трубчатый каркас вентиляционного блока

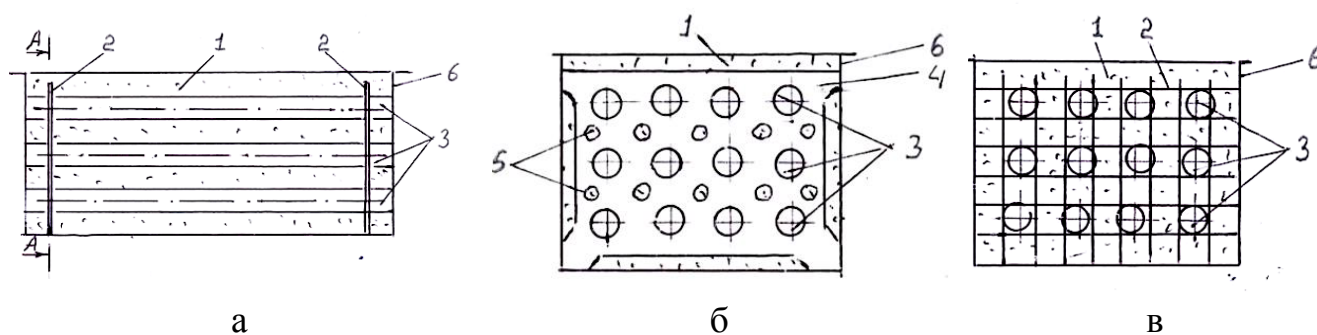


Рис. 2. Многопустотный бетонный блок со сборным несущим трубчатым каркасом:
а – изготовленный блок в форме; б – со стойками-шаблонами; в – со стойками-сетками.
1 – бетонная матрица; 2 – полимеркомпозитные сетки; 3 – полимеркомпозитные трубки;
4 – полимеркомпозитные шаблоны; 5 – технологические отверстия; 6 – форма

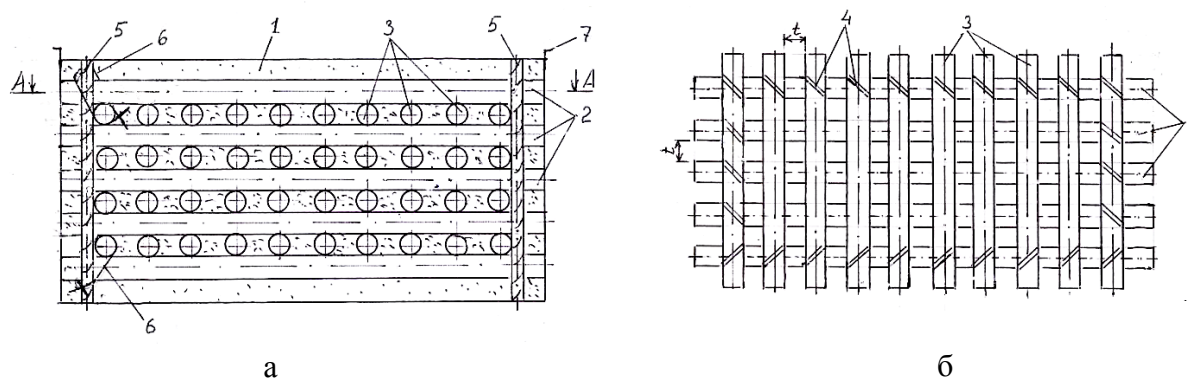


Рис. 3. Многопустотный бетонный блок из трубчатых слоев:
а – изготовленный блок в форме; б – сборный трубчатый плоский каркас;
1 – бетонная матрица; 2 – несущие продольные полимеркомпозитные трубки;
3 – несущие поперечные полимеркомпозитные трубки; 4 – скотч; 5 – вертикальные стойки;
6 – скрепляющие элементы; 7 – форма



Рис. 4. Модельные образцы – кубики, матрица которых равномерно заполнена дискретными пластиковыми трубками: а – на этапе формования; б – готовые образцы

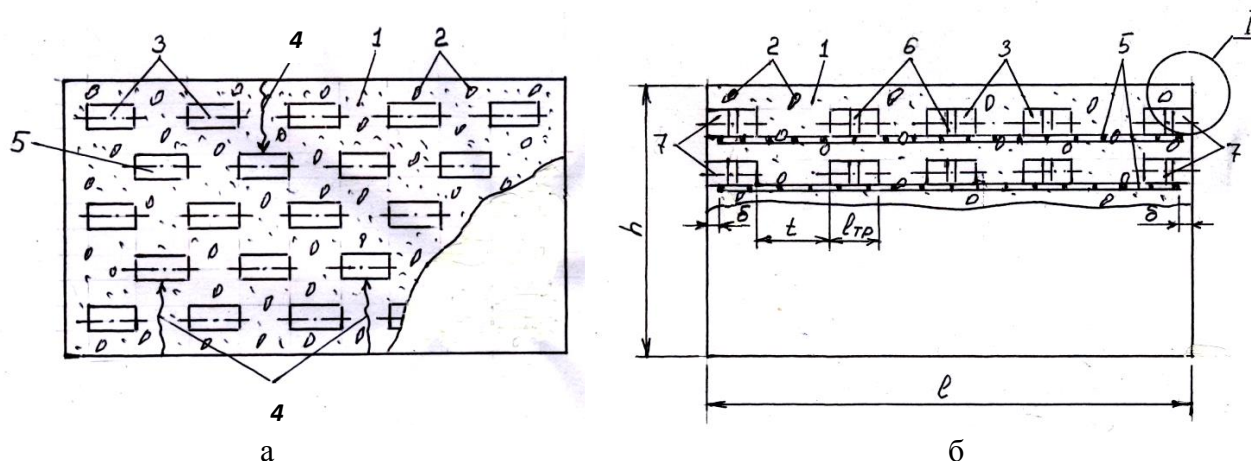


Рис. 5. Многопустотный бетонный блок с дискретным трубчатым каркасом:

- а – с плавающими пустотообразователями;
- б – со слоями из сетчатых подложек с пустотообразователями;
- 1 – бетонная матрица; 2 – зерна керамзитового гравия;
- 3 – пластиковые дискретные трубки; 4 – трещины,
- 5 – полимерные композитные сетки; 6 – скотч;
- 7 – крайние пластиковые дискретные трубки с магнитами

В первом варианте действенность предлагаемого технического решения достигается благодаря тому, что пустоты образованы сборным несущим трубчатым каркасом (в отличие от применяемых в настоящее время облегченных керамзитобетонных стеновых блоков, в которых пустоты возникают в процессе формирования с использованием сложного вибропрессовочного оборудования) (см. рис. 1, 2).

Несущий трубчатый каркас собирается из полимеркомпозитных непрерывных трубок, которые закрепляются в торцовых стойках. Последние могут быть выполнены, например, в виде перфорированных шаблонов (см. рис. 2б) или из композитных пустотелых стержней, образующих форму сетки (см. рис. 1а, 2в).

Основной процесс изготовления реализуется на этапе формирования, когда вначале в обычную форму устанавливают заранее изготовленный сборный трубчатый каркас, после чего укладывают бетонную смесь с уплотнением, например, на виброплощадке.

Для получения блока с максимальной пустотностью и повышенной прочностью предложен многопустотный бетонный блок из трубчатых слоев (см. рис. 3а), в котором на всю его высоту выполнены непрерывные чередующиеся трубчатые плоские каркасы (см. рис. 3б) из несущих продольных и поперечных полимеркомпозитных трубок.

По второму варианту при изготовлении многопустотных блоков предлагается использовать отходы производства полимеркомпозитных трубок (см. рис. 4) [3]. Эффективность предлагаемого решения обеспечивается за счет того, что в нашем случае пустоты образуются дискретными трубками и при этом равномерно распределяются во всем объеме изделия (см. рис. 5а). Описанная особенность отличает конструкцию от применяемых в настоящее время стеновых блоков, для которых характерны открытые непрерывные пустоты в виде каналов, расположенных вдоль одной центральной оси. Данная особенность возникает благодаря тому, что на этапе формирования послойно в бетонную матрицу устанавливают дискретные неизвлекаемые пустотообразователи –

дискретные трубки – согласно заданному их расположению (например, через соответствующий шаблон с отверстиями. После твердения образуется монолитная многопустотная структура повышенной прочности (см. рис. 4б).

Для изготовления блока повышенной прочности или меньшей толщины предлагается формировать пустоты слоями из сборных подложек, состоящих из герметичных пластиковых дискретных трубок, которые закрепляют скотчем на полимеркомпозитных сетках (см. рис. 5б).

Выполненный анализ использования пустотелых вкладышей для образования многопустотной структуры бетонной матрицы показал, что наиболее эффективно (по сравнению со сферическими вкладышами) применять вкладыши цилиндрической формы. При этом применение цилиндрических вкладышей, имеющих длину, равную диаметру, позволяет обеспечить их работу в матрице и формирование напряженного состояния, близкого к работе сферы. Это гарантирует создание более равномерного поля напряжений вокруг пустотелых вкладышей с видом напряженного состояния, отличающегося более высокой структурной прочностью бетонной матрицы, что в конечном счете улучшает механические свойства бетонного изделия [4].

Был рассмотрен также вопрос увеличения эффективности формирования облегченных бетонных изделий с ориентацией на физическое состояние смеси, выполнены исследования по обоснованию и учету оптимального реологического состояния модельной мелкозернистой бетонной смеси при формировании многопустотной структуры бетонного стенового блока согласно новой технологии [5].

Высокой технологичности изготовления способствуют отказ от сложного вибропрессовочного оборудования и задействование более простого (а именно формовочного оборудования) – виброплощадок, что обеспечивается сборным трубчатым каркасом, который собирают из полимеркомпозитных трубок и устанавливают в форме (см. рис. 1а, 2а), или использование дискретных трубок, которые возможно равномерно распределить во всем объеме изделия благодаря шаблону с отверстиями (см. рис. 3, 4). При этом появляется возможность на одном агрегате без переналадки, с одним типом формы изготавливать стеновые блоки различной заданной пустотности, что в итоге увеличивает эффективность производства.

Было выполнено моделирование новой конструкции многопустотных блоков с несущим трубчатым каркасом и дискретными пластиковыми трубками для перегородочной стены. Для этого были изготовлены образцы – кубики размером 150x150x150 мм. Бетонная матрица некоторых из этих образцов была равномерно заполнена в объеме непрерывным трубчатым каркасом из пластиковых трубок (см. рис. 1), а другая – из дискретных пластиковых трубок. Были проведены испытания на сжатие на машине МС-500. Определены средняя плотность и масса экспериментальных образцов, а также основной показатель звукоизоляции для перегородочных плит – индекс изоляции воздушного шума. Полученные в ходе испытаний результаты показали значительное снижение плотности, массы (на 11–13 %) и более высокий индекс изоляции указанного шума по сравнению с этим индексом аналогов, представленных на рынке. Изложенный материал подтверждает перспективность внедрения данного технического решения в практику изготовления и строительства с учетом требований потребителей к обеспечению комфортных жилищных условий.

Таким образом, описанное оригинальное техническое решение обеспечивает:

- упрощение технологии изготовления тепло- и звукоизоляционных блоков, а также вентиляционных блоков, так как используется мощное и энергоемкое оборудование;
- повышенную (по сравнению с аналогами, имеющимися на рынке) звуко- и теплоизоляцию;
- возможность регулирования пустотности блока;
- снижение массы блока;
- усиление прочности блока.

Действенность и полезность предлагаемого технического решения возрастают также за счет использования отходов производства полимеркомпозитных трубок в случае их дискретного применения.

Разработанный на базе сборного трубчатого каркаса многопустотный блок является конструктивной комбинированной системой и может работать более эффективно, чем стандартный многопустотный керамзитобетонный блок, так как вся конструкция может воспринимать более высокие нагрузки, включая динамические. При этом повышается технологичность выполнения основных операций изготовления нового многопустотного блока, уменьшается его масса.

Многофункциональность нового многопустотного блока возникает благодаря возможности его целенаправленного конструктивного изменения. Это изменение происходит во время создания блока в условиях цеха путем применения соответствующих сборных многоцелевых трубчатых каркасов. При этом учитывается конкретное использование (а именно какой блок изготавливается: тепло-, звукоизоляционный или вентиляционный).

Высокая технологичность изготовления многопустотных блоков обеспечивается, во-первых, за счет исключения из технологической цепочки сложной и дорогой операции вибропрессования, что снижает стоимость изготовления, а, во-вторых, в силу возможности быстрого перехода при изготовлении от одного вида многопустотного изделия к другому. Это реализуется с помощью применения быстро производимых сборных многоцелевых трубчатых каркасов, которые задействуют при формировании блоков соответствующего назначения (тепло-, звукоизоляционных и вентиляционных) с заданной пустотностью (см. рис. 1, 2).

Оригинальный комплекс технических решений обеспечивает повышенную эффективность изготовления и использования стеновых многопустотных блоков, которая достигается следующим образом:

на этапе изготовления – за счет высокотехнологичности, позволяющей при формировании многопустотных блоков брать стандартные формы и применять более простую и менее энергоемкую технологию (используются готовые сборные трубчатые каркасы-полуфабрикаты с возможностью их свободной установки в формах и надежной фиксации); снижения объема бетонной смеси на один блок благодаря большому объему, который занимает трубчатый каркас; использования менее мощного формовочного оборудования, уменьшения стоимости изготовления многопустотных блоков;

на этапе строительства – за счет снижения массы и возможности достижения максимальной пустотности через использование полимерных трубок различного диаметра, что позволяет работать на крановом оборудовании меньшей грузоподъемности; применения автотранспорта меньшей грузоподъемности или перевозки значительного количества блоков за одну поездку;

на этапе эксплуатации – за счет прочности пустотного бетонного блока, усиленной с помощью сборных многоцелевых трубчатых каркасов, отличающихся повышенной жесткостью; высокой надежности работы сборных блоков, то есть отсутствия трещинообразования в полимерных трубчатых каркасах и лучших экономических показателей.

Одним из способов достижения экономической эффективности является отказ от сложной технологии изготовления многопустотных блоков и полный переход на сборные трубчатые каркасы, обеспечивающие лучшие эксплуатационные свойства и существенный экономический эффект при снижении затрат на их изготовление. Последнему способствуют многие факторы, о которых мы говорили выше: отказ от сложной энергоемкой технологии изготовления и применения дорогого легкого заполнителя – керамзитового гравия; изготовление тепло-, звукоизоляционных и вентиляционных изделий по одной технологии; использование отходов производства полимеркомпозитных трубок для формирования объемной дискретной многопустотной структуры блока. При этом реализуется и социальный эффект, а именно возрастает комфортность среды, в которой люди осуществляют свою жизнедеятельность.

Экономическая эффективность предложенной разработки становится очевидной, если сравнить стоимость сложного вибропресса и виброплощадки. Так, цена вибропресса «Максимал» компании ZZBO составляет 3172000 рублей [6], а виброплощадки ВПК-5 2300 завода «Вибромаш» – 568845 рублей, что примерно в шесть раз меньше [7]! Кроме того, масса сборных стеновых многопустотных блоков снижается на 20–25%, следовательно, становится возможным за одну поездку перевозить больше изделий тем же транспортным средством, что также значительно повышает экономическую эффективность новых сборных многопустотных блоков. В то же время эти блоки за счет несущего жесткого трубчатого каркаса меньше подвержены разрушению в процессе эксплуатации, более долговечны.

Полученные положительные результаты модельных испытаний новой конструкции блоков позволяют сделать вывод, что их исполнение с несущим жестким трубчатым каркасом даст возможность в будущем полностью отказаться от дорогого легкого заполнителя – керамзитового гравия, что упростит технологию изготовления и улучшит физико-механические свойства рассмотренных блоков, значительно уменьшит их массу и стоимость изготовления.

Предлагаемый комплекс технических решений крайне актуален, так как позволяет существенно повысить эффективность изготовления и применения новых многопустотных стеновых блоков в жилищном и гражданском строительстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аралов Р.С., Римшин В.И. Анализ использования облегченных конструкций монолитных плит в российской и зарубежной практике // *Проблемы науки*. 2017. № 7. С. 24–29.
2. Трофимов В.И., Ясюкович В.А., Желев Н.А. К вопросу получения изделий из конструкционного легкого бетона на пустотелом заполнителе // *Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы 16-й Международной конференции*. Тула: ТулГУ. 2020. Т. 1. С. 273–279.
3. Ясюкович В.А., Трофимов В.И. Оценка эффективности изоляции воздушного шума перегородок из бетонных блоков с неизвлекаемыми трубчатыми пустотообразователями

// Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 3 (11). С. 35–44.

4. Трофимов В.И., Ясюкович В.А. Учет влияния формы пустотообразователей на напряженное состояние бетона // *Инновации и моделирование в строительном материаловедении и землеустройстве: Материалы V Международной научно-технической конференции*. Тверь: ТвГТУ. 2021. С. 138–144.

5. Трофимов В.И., Ясюкович В.А. Учет физического состояния дисперсной системы при формировании многопустотной структуры бетона // *Эффективные методологии и технологии управления качеством строительных материалов: Материалы национальной научно-технической конференции*. Новосибирск: НГАУ. 2021. С. 210–214.

6. Вибропресс «Максимал» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zzbo.ru/product/vibropress-maksimal/> (дата обращения: 14.04.2023).

7 Вибромаш: официальный сайт завода-изготовителя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://vibromash.com/catalog/vibroploshchadki_vpk_shirinoi_2300/vpk_5_2300 (дата обращения: 14.04.2023).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Трофимов В.И. Высокотехнологичные стеновые и вентиляционные блоки с несущим трубчатым каркасом // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 2 (18). С. 27–35.

HIGH-TECH WALL AND VENTILATION UNITS WITH A SUPPORTING TUBULAR FRAME

V.I. Trofimov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article deals with the issue of increasing the efficiency of manufacturing and working under load of lightweight concrete products, taking into account the use of void formers of various shapes and the rheological state of the mixture. The methods of obtaining multi-hollow concrete products as wall products are considered and a new method of forming their multi-hollow structure based on the use of tubular frames and the technology of their manufacture is proposed.

Keywords: concrete, multi-hollow concrete products, tubular frame, rheological condition.

REFERENCES

1. Aralov R.S., Rimshin V.I. Analysis of the use of lightweight monolithic slab structures in Russian and foreign practice. *Problemy nauki*. 2017. No. 7, pp. 24–29. (In Russian).
2. Trofimov V.I., Yasyukovich V.A., Zhelev N.A. On the issue of obtaining products from structural lightweight concrete on a hollow aggregate. *Socio-economic and environmental problems of mining, construction and energy: Proceedings of the 16th International Conference*. Tula: TulGU. 2020. Vol. 1, pp. 273–279. (In Russian).
3. Yasyukovich V.A., Trofimov V.I. Evaluation of the effectiveness of air noise isolation of partitions made of concrete blocks with non-removable tubular voids. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himicheskie tehnologii»*. 2021. No. 3 (11), pp. 35–44. (In Russian).
4. Trofimov V.I., Yasyukovich V.A. Taking into account the influence of the shape of voids on the stress state of concrete. *Innovations and modeling in Building Materials Science and Land management: Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference*. Tver: TvSTU. 2021, pp. 138–144. (In Russian).
5. Trofimov V.I., Yasyukovich V.A. Consideration of the physical state of the dispersed system in the formation of a multi-cavity structure of concrete. *Effective methodologies and technologies for quality management of building materials: Materials of the National Scientific and Technical Conference*. Novosibirsk: NGAU. 2021, pp. 210–214. (In Russian).
6. Vibropress «Maximal» [Electronic resource]. – Access mode: <https://zzbo.ru/product/vibropress-maksimal/> (date of access: 04.14.2023). (In Russian).
7. Vibromash: the official website of the manufacturer [Electronic resource]. – Access mode: https://vibromash.com/catalog/vibroploshchadki_vpk_shirinoy_2300/vpk_5_2300 (date of access: 04.14.2023). (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Trofimov V.I. High-tech wall and ventilation units with a supporting tubular frame // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2023. No. 2 (18), pp. 27–35.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 674.093

**ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ОСАДКОВ,
ВЫПАВШИХ В ТВЕРИ В 2016–2022 ГГ.****Ф.В. Качановский***Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Качановский Ф.В., 2023

Аннотация. Выполнен статистический анализ влияния метеофакторов на удельную электропроводность атмосферных осадков, выпавших в Твери в 2016–2022 гг. Подтверждено и уточнено существование корреляционных связей удельной электропроводности осадков, выпадающих в Твери, с показателем кислотности pH , температурой воздуха и количеством осадков при удлинении ряда наблюдений на два года (с пяти лет до семи).

Ключевые слова: удельная электропроводность, кислотность, атмосферные осадки, модель, временной ряд, тренд, циклическая компонента, сезонная компонента, случайная компонента, показатель кислотности pH .

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-2-36-43

Электропроводность атмосферных осадков – фактор, подверженный природным и антропогенным воздействиями. Его исследованием занимаются экологи, гидрологи и специалисты других профилей [1–9].

Начиная с 2016 г. регулярные наблюдения за электропроводностью осадков, выпадающих в Твери, проводит лаборатория мониторинга окружающей среды Тверского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. В течение 2016–2022 гг. произведены 904 измерения, в среднем 11 измерений в месяц. Удельная электропроводность осадков измеряется в микросименсах на сантиметр (мкСм/см). Ряд измеренных (срочных) значений удельной электропроводности осадков (далее обозначается как cw) и кубический тренд ряда показаны на рис. 1.

Одновременно с электропроводностью измеряется показатель кислотности осадков pH (безразмерная величина). Наблюдения за кислотностью осадков лаборатория проводит с 1990 г. Срочные измерения обеих величин, электропроводности и кислотности производятся одновременно, интервалы между измерениями варьируются от одних суток до двух декад (в соответствии с датами выпадения осадков).

В целях статистического анализа кислотности осадков срочные значения показателя pH , наблюдаемые уже более 30 лет, преобразованы в среднемесячные значения $ampH$ [3–5]. Это позволило сформировать из значений $ampH$ равномерный временной ряд с одинаковыми (месячными) интервалами, что удобно для изучения связей кислотности осадков с основными метеофакторами.

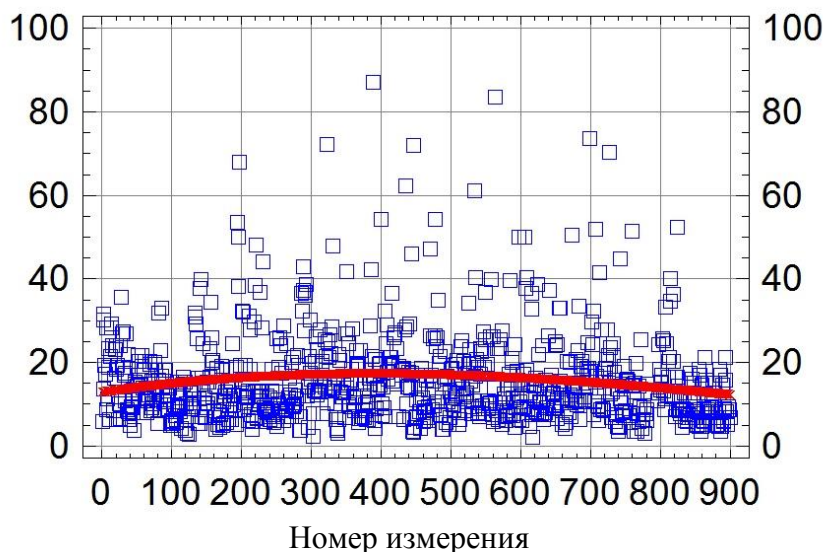


Рис. 1. Ряд измеренных значений удельной электропроводности cw и его кубический тренд (2016–2022 гг.)

Аналогично срочные значения удельной электропроводности cw преобразованы в среднemesячные значения $amcw$, из которых построены временные ряды [5]. Наблюдения за электропроводностью непродолжительны, поэтому ряды среднemesячных значений $amcw$ имеют небольшую длину. В настоящей статье рассматриваются (сравниваются) ряды $amcw$ длиной 4 года (2016–2019), 5 (2016–2020), 6 (2016–2021) и 7 лет (2016–2022), состоящие из 48, 60, 72, 84 и 96 членов соответственно.

В работе [5] нами был подробно (применительно к четырехлетнему ряду наблюдений) обсужден вопрос о выборе модели тренда величины cw и, соответственно, величины $amcw$. В качестве моделей тренда использованы линии регрессии. Сопоставлены три модели простой регрессии: линейная, экспоненциальная и логарифмическая.

Для коротких (четырёхлетних) рядов вполне подходящей оказалась линейная модель, которой соответствует коэффициент корреляции 0,22466. В настоящей статье рассматриваются в связи с удлинением ряда наблюдений до семи лет квадратические и кубические модели трендов cw и $amcw$. На рис. 2 и 3 показаны для сравнения квадратические регрессионные модели для рядов cw и $amcw$ длиной 4, 5, 6 и 7 лет. Уравнения квадратических моделей трендов cw и $amcw$ для таких рядов имеют вид:

а) для cw :

$$\begin{aligned} cw4 &= 13,8331 + 0,0109582 \cdot n - 0,00000549024 \cdot n^2; \\ cw5 &= 14,4567 + 0,00714416 \cdot n - 0,00000442129 \cdot n^2; \\ cw6 &= 14,9057 + 0,0054197 \cdot n - 0,00000444141 \cdot n^2; \\ cw7 &= 15,1674 + 0,00491107 \cdot n - 0,00000553642 \cdot n^2 \end{aligned}$$

б) для $amcw$:

$$\begin{aligned} amcw4 &= 14,1556 + 0,109514 \cdot n - 0,000253528 \cdot n^2; \\ amcw5 &= 13,4690 + 0,207113 \cdot n - 0,00256658 \cdot n^2; \\ amcw6 &= 13,5141 + 0,197772 \cdot n - 0,00232182 \cdot n^2; \\ amcw7 &= 13,3917 + 0,207818 \cdot n - 0,00245135 \cdot n^2. \end{aligned}$$

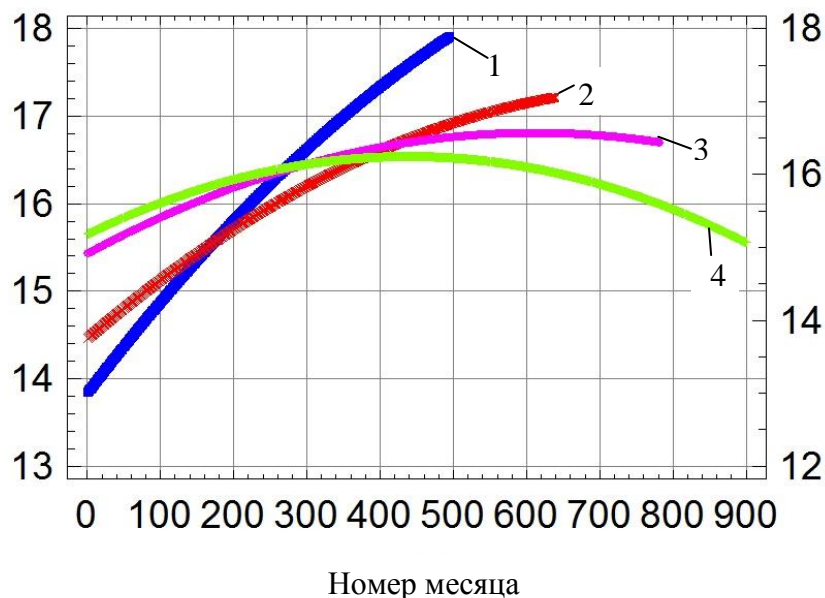


Рис. 2. Квадратические модели трендов sw для рядов длиной: 1 – 4 года (2016–2019); 2 – 5 лет (2016–2020); 3 – 6 лет (2016–2021); 4 – 7 лет (2016–2022)

Зависимость вида трендов sw от длины ряда проявляется в том, что чем продолжительнее ряд, тем более пологой оказывается возрастающая часть его тренда (см. рис. 2). При этом тренд шестилетнего ряда достигает максимума на 610-м месяце измерений (1 января 2021 г.), а у семилетнего ряда максимум наступает раньше, на 439-м месяце измерений (24 июля 2019 г.).

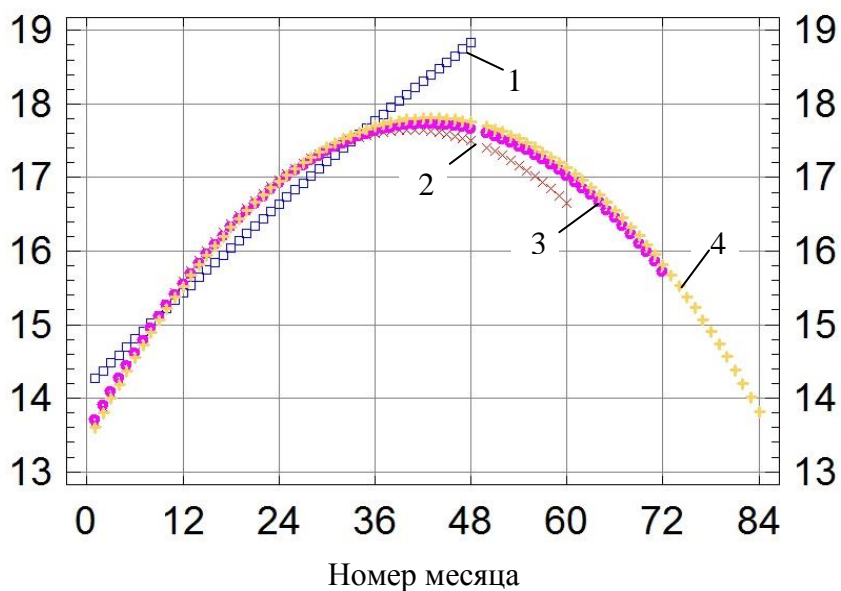


Рис. 3. Квадратические модели трендов $atcw$ для рядов длиной: 1 – 4 года; 2 – 5 лет; 3 – 6 лет; 4 – 7 лет

На начальном (примерно трехлетнем) отрезке линии трендов $atcsw$ шести- и семилетнего рядов совпадают при замедляющемся росте (см. рис. 3). Тренд пятилетнего ряда достигает максимума на 40-м месяце, а тренд шестилетнего – на 43-м. Пройдя точку своего максимума, линия пятилетнего тренда понижается быстрее линии шестилетнего. Нисходящая ветвь шестилетнего ряда совпадает с семилетним до самого конца.

Как уже отмечалось в [7], у самых коротких, четырехлетних, рядов тренды sw и $atcsw$ быстро возрастают почти линейно, что вызывает сомнение в их достаточной пригодности при оценке поведения электропроводности в 2016–2019 гг. Шести- и семилетние ряды ведут себя более спокойно и закономерно.

Для сопоставления поведения рядов показателя кислотности $ampH$ и электропроводности $atcsw$ осадков оказалось целесообразным построение кубического тренда $atcsw$, поскольку поведение кубического тренда $ampH$ подробно рассмотрено нами, например, в [8].

Уравнения кубических трендов $atcsw$ и $ampH$ для семилетнего ряда осадков имеют вид:

$$atcsw = 14,7595 + 0,0191426 \cdot n + 0,00306606 \cdot n^2 - 0,000042797 \cdot n^3;$$

$$ampH = 5,68193 + 0,00400086 \cdot n - 0,000314676 \cdot n^2 + 0,00000365684 \cdot n^3.$$

Сравнение кубических трендов $ampH$ и $atcsw$, показанных на рис. 4, демонстрирует обратную связь этих величин. Линейный коэффициент корреляции семилетних трендов составляет $-0,950643$, в то время как для шестилетних [7] корреляция слабее: ее коэффициент равен $-0,87164$. Это объясняется, на наш взгляд, тем, что при удлинении рядов их тренды распрямляются, становятся более пологими, то есть более похожими друг на друга, и корреляция растет.

Синхронность глобальных экстремумов противоположного знака, наблюдавшаяся у шестилетних рядов [7], оказалась непродолжительной и исчезла у семилетних в результате упомянутого распрямления их трендов.

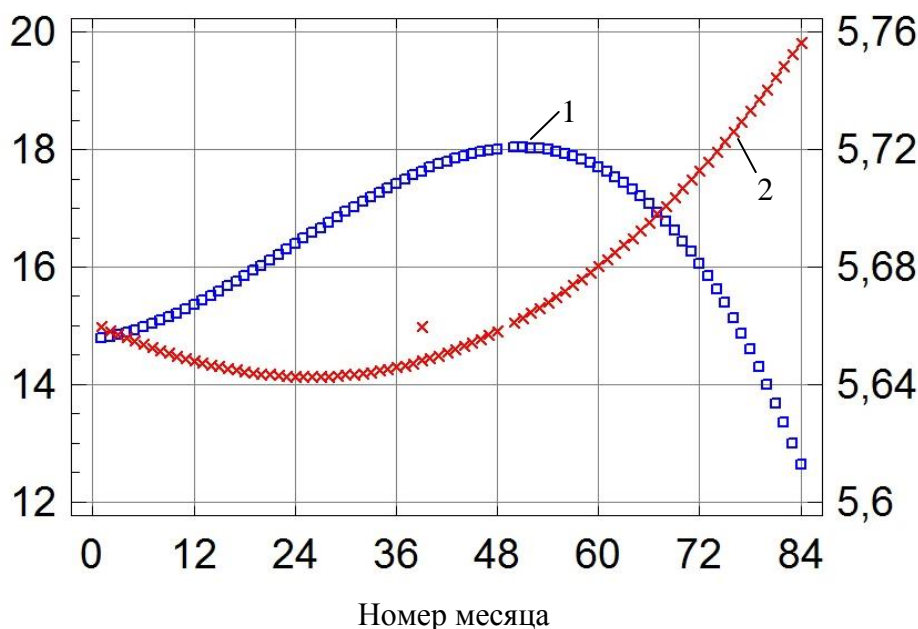


Рис. 4. Кубические тренды семилетних (2016–2022) рядов:
1 – $atcsw$; 2 – $ampH$

Удлинение ряда $atcw$ на один год (то есть до семи лет) привело к дальнейшему изменению формы кубической модели его тренда (рис. 5).

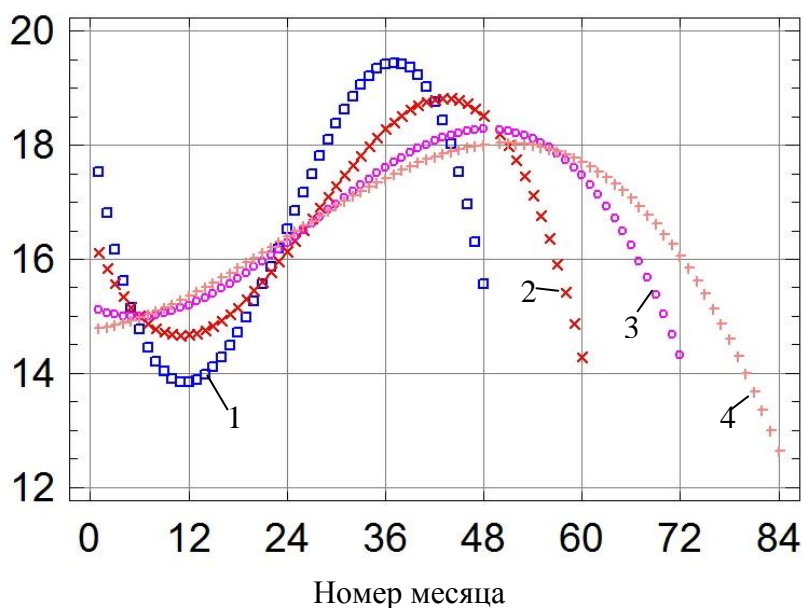


Рис. 5. Кубические тренды $atcw$ рядов длиной: 1 – 4 года; 2 – 5 лет; 3 – 6 лет; 4 – 7 лет

Максимум тренда четырехлетнего ряда (со значением 19,447) наступил в январе 2019 г., максимум тренда у пятилетнего (со значением 18,817) пришелся на июль 2019 г. Шестилетний ряд (со значением 8,281) достиг максимального значения тренда (18,290) в декабре 2019 г., а у семилетнего ряда (со значением 18,0934) максимум тренда наступил в марте 2020 г.). Отметим еще одну особенность: чем длиннее ряд, тем больше «отстает» (по времени) момент наступления максимума кубического тренда от окончания процесса наблюдений. В месяцах разница составляет 11, 17, 24 и 33 соответственно. Удлинение конечных нисходящих участков трендов происходит одновременно с уменьшением их наклона.

Сезонная декомпозиция шести- и семилетнего рядов $atcw$ позволила установить, что изменения, произошедшие с $atcw$ за последний год наблюдений, не имеют принципиального характера.

Тренд семилетнего ряда стал более «распластанным» во времени по сравнению с трендом шестилетнего ряда, а размах его несколько уменьшился.

Различия сравниваемых рядов обусловлены, как уже отмечалось при сравнении шести- и пятилетнего рядов [7], по нашему мнению, влиянием длины ряда на вид кубического тренда. Используемая кубическая модель дает предварительное (приближенное) представление о действительном поведении электропроводности осадков. Исходя из эволюции кубической модели за время наблюдений, можно предположить, что модель станет вполне пригодной лишь при дальнейшем удлинении ряда наблюдений за электропроводностью sw . Можно, в частности, ожидать, что при удлинении ряда наблюдений будут происходить «распластывание» тренда и уменьшение его размаха.

Сравнение циклических компонент шести- и семилетнего рядов $amcw$, полученных также в результате сезонной декомпозиции рядов (здесь не показано), выявляет, что общий характер поведения этих компонент весьма схож с тем, который наблюдался при сравнении пяти- и шестилетних рядов. Колебания (в сторону увеличения значений и в сторону уменьшения) происходят синхронно, размах колебаний незначителен. Значит, удлинение ряда $amcw$ не привело к существенному изменению периодичности циклов. Это указывает на стабильность факторов, определяющих циклическую компоненту ряда $amcw$ и ряда cw в целом.

Динамика удельной электропроводности $amcw$ внутри каждого года наблюдений оценивалась по сезонным компонентам временных рядов [5]. Период сезонных колебаний p принят равным числу месяцев в году, то есть 12. Оценкой сезонной компоненты служит \hat{s}_i – среднее отклонений $amcw$ от тренда \hat{tr}_i [3], то есть положено, что для среднемесячной удельной электропроводности

$$\hat{s}_i = \frac{1}{m+1} \cdot \sum_{l=0}^m (amcw_{i+lp} - \hat{tr}_{i+lp}) \text{ для } i = 1, \dots, p,$$

где $m+1$ – число (годовых) периодов в ряду наблюдений.

Годовой ход сезонных компонент (месячных индексов) обоих рядов рассмотрен в [7]. Сходный характер динамики индексов проявляется отчетливо. Разница состоит в некоторой сглаженности хода индексов более длинных рядов по сравнению с короткими, что соответствует общей тенденции сглаживания параметров временных рядов при их удлинении и проявляется наиболее ярко при сравнительно небольшой длине рядов.

Выводы:

1. Еще раз подтверждено существование обратной корреляционной связи удельной электропроводности осадков, выпадающих в Твери, с показателем кислотности pH при удлинении ряда наблюдений на один год (с шести лет до семи).

2. Представляется перспективной кубическая модель тренда среднемесячных значений удельной электропроводности атмосферных осадков при продолжительных наблюдениях.

3. Внутригодовая динамика удельной электропроводности при удлинении ряда наблюдений существенно не изменилась.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Качество воды в Центральной Азии. Общие и суммарные показатели качества вод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://cawater-info.net/water_quality_in_ca/hydrochem1.htm (дата обращения: 14.04.2023).
2. Янченко Н.И. Особенности изменения величины pH и электропроводности снежного покрова в Братске // *Известия Томского политехнического университета. Химия и химические технологии*. 2014. Т. 325. № 3. С. 23–30.
3. Качановский Ф.В. Электропроводность осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2019. № 3 (3). С. 65–71.
4. Качановский Ф.В. Связь электропроводности осадков, выпадающих в Твери, с метеофакторами // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2020. № 3 (7). С. 69–76.

5. Качановский Ф.В. Удельная электропроводность осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2020. № 4 (8). С. 89–97.
6. Качановский Ф.В. Анализ особенностей электропроводности осадков, выпавших в Твери в 2016–2020 гг. // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2021. № 2 (10). С. 47–55.
7. Качановский Ф.В. Что происходит с электропроводностью осадков, выпадающих в Твери, при удлинении ряда наблюдений // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2021. № 4 (12). С. 66–73.
8. Качановский Ф.В. О кислотности осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 66–74.
9. Качановский Ф.В. Об электропроводности осадков, выпавших в Твери в 2016–2021 гг. // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 4 (16). С. 34–40.
10. Голицын А.Н. Инженерная геоэкология: учебник для студентов учреждения среднего профессионального образования. М.: Оникс, 2007. 202 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КАЧАНОВСКИЙ Феликс Вячеславович – доцент кафедры «Гидравлика, теплотехника и гидропривод», ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: felix.kachanovsky@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Качановский Ф.В. Электропроводность осадков, выпавших в Твери в 2016–2022 гг. // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 2 (18). С. 36–43.

INFLUENCE OF METEOROLOGICAL CONDITIONS UPON THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE PRECIPITATION IN TVER DURING 2016–2022 YEARS

F.V. Kachanovsky

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Analysis had made of the precipitation's electrical conductivity (atmospheric precipitation had fallen in Tver in 1916–2022 years) and factors of the influence on it. Time series models of the electrical conductivity were examined. Cubic model has considered as adequate.

Keywords: conductivity, acidity, acid rain, precipitation, model, time series, trend, cycle component, seasonal component, correlation.

REFERENCES

1. Water quality in Central Asia. General and summary indicators of water quality [Electronic resource]. – Access mode: http://cawater-info.net/water_quality_in_ca/hydrochem1.htm (date of access: 14.04.2023). (In Russian).
2. Yanchenko N.I. Features of the change in the pH and electrical conductivity of the snow cover in Bratsk. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Himiya i himicheskie tekhnologii*. 2014. Vol. 325. No. 3, pp. 23–30. (In Russian).
3. Kachanovsky F.V. Electrical conductivity of the precipitation in Tver. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2019. No. 3 (3), pp. 65–71. (In Russian).
4. Kachanovsky F.V. Connection of electrical conductivity of precipitation falling in Tver with weather factors. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2020. No. 3 (7), pp. 69–76. (In Russian).
5. Kachanovsky F.V. Electrical specific conductivity of the precipitation in Tver. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2020. No. 4 (8), pp. 89–97. (In Russian).
6. Kachanovsky F.V. Analysis of the electrical conductivity of precipitation in Tver in 2016–2020. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2021. No. 2 (10), pp. 47–55. (In Russian).
7. Kachanovsky F.V. What happens of a lengthening of time series for electrical conductivity of the precipitation in Tver. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2021. No. 4 (12), pp. 66–73. (In Russian).
8. Kachanovsky F.V. About the acidity of precipitation falling in Tver. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2020. No. 2 (6), pp. 66–74. (In Russian).
9. Kachanovsky F.V. About of the electrical conductivity of the precipitation in Tver during 1916–2021 years. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2022. No. 4 (16), pp. 34–40. (In Russian).
10. Golitsyn A.N. *Inzhenernaya geoekologiya* [Engineering geocology]. Moscow: Oniks, 2007. 202 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KACHANOVSKY Felix Vjacheslavovich – Associate Professor of the Department of Hydraulics, Heat Engineering and Hydraulic Drive, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kachanovsky F.V. Influence of meteorological conditions upon the electrical conductivity of the precipitation in Tver during 2016–2022 years // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2023. No. 2 (18), pp. 36–43.

УДК 44.31.03:45.43.00:53.07.00

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ЗАКОНОВ
КВАНТОВОГО ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ.
ЧАСТЬ I. ЗАКОНЫ КВАНТОВОГО ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ**

*А.Н. Макаров**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., 2023

Аннотация. Приведено описание первого закона квантового теплового излучения ионизированных и неионизированных газовых объемов любой формы и величины. Дано математическое описание вывода второго-пятого законов квантового теплового излучения цилиндрических газовых объемов. Указано, что цилиндрическими газовыми объемами можно моделировать тепловое излучение электрических дуг электродуговых сталеплавильных, факельных нагревательных печей, топков паровых котлов электростанций, факелов камер сгорания газотурбинных установок электростанций, газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: квант, законы, тепловое излучение, газовые объемы, факел, электрическая дуга, печи, топки, камеры сгорания.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-2-44-54**ВВЕДЕНИЕ**

С 1940–1950-х гг. по настоящее время широкое распространение получило факельное сжигание газообразного, жидкого, пылевидного топлива в топках паровых котлов электростанций, камерах сгорания газотурбинных установок электростанций, газотурбинных двигателей в авиации. При факельном сжигании топлива образуются излучающие газовые объемы, причем 92–95% мощности факелов при сгорании топлива преобразуется в поток теплового излучения газовых объемов, а на долю конвекции и теплопроводности приходится 5–10% мощности факелов. Процесс горения топлива сопровождается переходом атомов, участвующих в реакции горения веществ, из одного стационарного состояния в другое с испусканием кванта теплового излучения. Испускание кванта указанного излучения происходит при переходе электрона с более удаленной от ядра орбиты на более близкую (см. второй постулат Бора). Для факельного сжигания топлива характерно трехмерное объемное квантовое излучение. В факеле, газовом объеме излучают кванты квадриллионы (10^{15} – 10^{45}) атомов. Излучение кванта каждого атома на расчетную площадку необходимо учесть, что является сверхсложной задачей. Для расчета теплового излучения на расчетную площадку квантов всех атомов, составляющих газовый объем, необходимо решение трехкратных интегральных уравнений. В XX–XXI вв. в мире не были решены вышеназванные уравнения для определения средней длины пути квантов от излучающих атомов газовых объемов, угловых коэффициентов излучения, потоков излучения газовых объемов на указанные площадки. В XX столетии законы теплового излучения газовых объемов не были открыты.

В 1996–2001 гг. автором настоящей статьи были открыты законы теплового квантового излучения газовых объемов, а именно первый закон теплового квантового излучения газовых объемов любой формы и величины, второй-пятый законы теплового квантового излучения цилиндрических и сферических газовых объемов. Цилиндрическими и сферическими газовыми объемами различных размеров, вплоть до сфер атомов, можно моделировать квантовое тепловое излучение электрических дуг и факелов любых размеров и форм, вписывая обозначенные объемы в электрические дуги электродуговых сталеплавильных печей и факелы печей, топков, камер сгорания. С открытием автором законов квантового теплового излучения газовых объемов появилась возможность получить полную картину теплообмена в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках, камерах сгорания, организовать в печах, топках, камерах сгорания рациональный теплообмен, снизить расход топлива и электроэнергии.

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕПЛООВОГО КВАНТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ

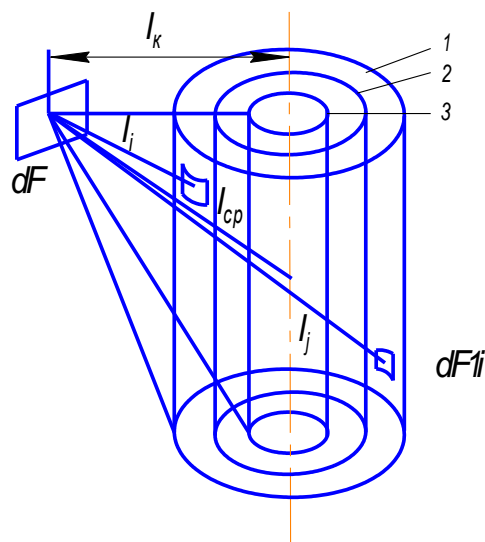
Сущность открытия заключается в следующем. Факел, создаваемый одиночной горелкой в печах и камерах сгорания, представляет собой эллипсоид вращения, в объеме которого происходит реакция горения топлива, а продукты сгорания вытесняются из эллипсоида новыми порциями топлива и окислителя. В эллипсоид вращения вписываются излучающие и поглощающие цилиндрические газовые объемы, которыми моделируется факел [1]. В топках паровых котлов факел представляет собой эллиптический газовый цилиндр, в который вписываются несколько десятков прямых круговых цилиндрических газовых объемов [2].

Рассмотрим топку парового котла энергоблока 300 МВт ТГМП-314, которая представляет собой прямоугольный параллелепипед высотой $H_T = 35$ м, шириной $a = 14$ м, глубиной $b = 7$ м. Факел и продукты горения занимают все пространство камеры топки. Форма факела по всей высоте топки – это эллиптический цилиндрический газовый объем, в который могут быть вписаны два или несколько (то есть более двух) круговых цилиндрических газовых объема. Изотермы делят круговые цилиндрические газовые объемы по высоте на несколько изотермических круговых цилиндрических или десятков изотермических круговых цилиндрических газовых объемов. Опишем излучение одного изотермического кругового цилиндрического газового объема, множеством которых моделируется факел, на элементарную площадку dF размером $0,5 \times 0,5$ м (рисунок).

Допустим, что при сгорании топлива образуется изотермическое цилиндрическое газовое тело высотой 10 м, диаметром 4,9 м. Объем этого тела равен $180,9$ м³. За 1 ч выделяется 700 МВт · ч энергии, которая равномерно распределяется по всему газовому объему цилиндра. Разделим изотермический цилиндрический излучающий и поглощающий газовый объем на три равных по объему цилиндрических тела, слоя 1–3 (рисунок). Радиус третьего цилиндра 1,39 м, второго 1,96, первого 2,4 м. Объем каждого цилиндрического слоя $60,3$ м³. Перпендикуляр к центру элементарной площадки проходит под углом 90° к оси симметрии цилиндрических газовых слоев через их верхнее основание. Кратчайшее расстояние l_k от оси коаксиальных цилиндрических газовых объемов, слоев до элементарной площадки составляет 5,2 м.

Изотермические цилиндрические газовые объемы равномерно заполнены излучающими частицами, атомами. Допустим, количество одновременно излучающих кванты энергии атомов в каждом из трех цилиндрических газовых объемов равно $10 \cdot 10^{30}$, общее

количество атомов – $30 \cdot 10^{30}$, и атомы равномерно распределены по всему газовому объему. Время пребывания излучающих частиц в топке 1–2 с.



К расчету излучений от коаксиальных цилиндров:

l_i, l_j – расстояния от элементарных площадок до расчетной площадки;

l_{cp} – среднearифметическое расстояние от элементарных площадок до расчетной площадки dF ; dFi – часть поверхностного слоя атомов цилиндра 1

Плотность потока теплового излучения q_Φ , падающего от цилиндрического газового объема, факела на расчетную площадку на экранной поверхности труб топки, определяется тройным интегралом по высоте H , периметру Π и радиусу r большого цилиндрического объема 1, учитывающим излучение квантов всех $30 \cdot 10^{30}$ излучающих атомов на расчетную площадку dF :

$$q_\Phi = \iiint_{H \Pi r} \frac{P_i \cos \alpha_i \cos \beta_i}{\pi^2 \ell_i^2} d\alpha_i d\beta_i d\ell_i, \quad (1)$$

где α_i, β_i – углы между направлением излучения и нормалью соответственно к поверхности излучающей частицы, атома и расчетной площадки; P_i – мощность кванта излучения частицы, атома; ℓ_i – расстояние от излучающего атома до расчетной площадки.

Расчет трехкратного интеграла (1) представляет собой сложную математическую задачу. Решение задачи теплового излучения газовых объемов (1) в XX в., как следует из сказанного во введении, не было найдено, поэтому излучающие газовые объемы в расчетах безуспешно моделировались тепловым излучением множества твердых тел, заполняющих газовый объем. В XXI в. положение изменилось: в 2001 г. на помощь в расчетах теплового квантового излучения факелов приходят открытые автором в России законы теплового квантового излучения газовых объемов [3].

Первый закон теплового квантового излучения газовых объемов любой формы и любых размеров имеет следующую формулировку и математическую запись: «Плотность потока теплового излучения, падающего от газового объема на расчетную площадку, прямо пропорциональна его мощности, угловому коэффициенту излучения и обратно пропорциональна коэффициенту поглощения,

средней длине пути квантов от всех атомов объема до площадки и площади площадки»:

$$q_{FdF} = \frac{\varphi_{FdF} P_F}{F e^{\kappa \ell}}, \quad (2)$$

где φ_{FdF} – локальный угловой коэффициент излучения газового объема на расчетную площадку dF ; P_F – мощность теплового излучения газового объема; F – площадь поверхности расчетной площадки dF ; κ – коэффициент поглощения газовой среды печи, топки, камеры сгорания; ℓ – средняя длина пути квантов от всех атомов газового объема до расчетной площадки.

При вычислении по выражению (2) возникает сложность с определением локальных угловых коэффициентов излучения газовых объемов на расчетные площадки и вычислением средней длины пути квантов от всех атомов газового объема до расчетной площадки. Однако на помощь в расчетах локальных угловых коэффициентов излучения газовых объемов и средней длины пути квантов от атомов до расчетной площадки приходят другие (второй-пятый) законы теплового излучения цилиндрических газовых объемов. При открытии очередных законов теплового квантового излучения газовых объемов использовали описанные ниже допущения и математические вычисления.

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕПЛООВОГО КВАНТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ

Допустим, что излучение внутренних слоев атомов цилиндрических газовых объемов поглощается соседними слоями и наружу выходит излучение только наружных поверхностных слоев указанных атомов. В этом случае излучение изотермических коаксиальных цилиндрических газовых объемов, слоев можно представить излучением трех цилиндров (см. рисунок). Локальные угловые коэффициенты излучения цилиндров 1–3 на dF определяются следующим образом [4]:

$$\begin{aligned} \varphi_{F_1 dF} &= \frac{\varphi_{dFF_1} F_{dF}}{F_1} = \frac{0,23 \cdot 0,25}{3,14 \cdot 4,8 \cdot 10} = 0,0003815; \\ \varphi_{F_2 dF} &= \frac{\varphi_{dFF_2} F_{dF}}{F_2} = \frac{0,188 \cdot 0,25}{3,14 \cdot 3,92 \cdot 10} = 0,0003815; \\ \varphi_{F_3 dF} &= \frac{\varphi_{dFF_3} F_{dF}}{F_3} = \frac{0,133 \cdot 0,25}{3,14 \cdot 2,78 \cdot 10} = 0,0003815, \end{aligned} \quad (3)$$

где φ_{FdF} – угловые коэффициенты излучения элементарной площадки на цилиндры соответственно 1–3 (см. рисунок); F_{dF} – площадь элементарной площадки dF ; F_1 – F_3 – площадь боковой поверхности цилиндров 1–3 (см. рисунок).

Из результатов расчета (3) следует второй закон теплового излучения цилиндрических газовых объемов: «Локальные угловые коэффициенты квантового излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов, слоев равны». Математическая запись второго закона имеет вид

$$\varphi_{F_1 dF} = \varphi_{F_2 dF} = \varphi_{F_3 dF}. \quad (4)$$

Второй закон теплового квантового излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов был впервые рассмотрен в [2] и подтвержден в [1]. При моделировании

излучения сотен и тысяч коаксиальных цилиндрических газовых слоев, входящих в объем первого цилиндра, получили бы аналогичный результат: локальные угловые коэффициенты квантового излучения коаксиальных цилиндрических газовых слоев равны. Из равенства этих коэффициентов следует равенство средних угловых коэффициентов квантового излучения коаксиальных цилиндрических объемов, слоев, так как они представляют собой сумму элементарных угловых коэффициентов квантового излучения коаксиальных цилиндрических объемов, слоев. Средний угловой коэффициент излучения показывает долю излучения коаксиального цилиндрического объема, слоя на поверхность, состоящую из множества элементарных площадок. Из первого закона следует, что при расчете угловых коэффициентов квантового излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов, слоев достаточно определить угловой коэффициент квантового излучения коаксиального цилиндрического объема малого диаметра, соосного с цилиндрическим газовым объемом, то есть цилиндрической оси симметрии газовых объемов (см. рисунок).

Угловые коэффициенты излучения являются основными расчетными величинами теплообмена излучением. Угловой коэффициент квантового излучения представляет собой сложную геометрическую характеристику формы, размеров и взаимного расположения двух тел, находящихся в состоянии теплообмена излучением друг с другом. Обычно в технических расчетах наибольшие трудности связаны с определением геометрических характеристик теплообмена излучением между телами. При использовании аналитических методов расчета элементарные и средние угловые коэффициенты квантового излучения тел определяются путем прямого интегрирования соответствующих зависимостей для коэффициентов. Интегрирование при определении угловых коэффициентов квантового излучения тел, поверхностей, объемов связано с вычислением двух- и четырехкратных интегралов, что существенно усложняет задачу. При расчете углового коэффициента квантового излучения большого цилиндрического газового объема l на площадку dF (см. рисунок) необходимо проводить интегрирование как по высоте, так и по периметру и глубине цилиндрического объема, слоя, то есть решать трех-, четырехкратный интеграл. Второй закон освобождает нас от трех-, четырехкратного интегрирования и позволяет решить задачи с помощью однократного интегрирования по высоте цилиндрического газового объема малого диаметра, цилиндрической оси симметрии.

Таким образом, второй закон квантового излучения изотермических коаксиальных цилиндрических газовых излучающих объемов, из которых состоят электрическая дуга и факел, позволяет находить угловые коэффициенты квантового излучения любого цилиндрического газового объема путем однократного интегрирования геометрических и тригонометрических зависимостей коаксиального цилиндрического газового объема малого диаметра или, как его часто определяют, цилиндрического линейного источника излучения. Автором путем интегрирования геометрических зависимостей между линейными источниками излучения и поверхностями нагрева при любых их пространственных расположениях практически решены задачи определения угловых коэффициентов квантового излучения указанных тел и поверхностей [5–7]. Иными словами, из второго закона теплового квантового излучения изотермических цилиндрических газовых объемов получены аналитические зависимости для определения угловых коэффициентов квантового излучения изотермических коаксиальных цилиндрических газовых объемов любых размеров при различном пространственном расположении газовых объемов и поверхностей нагрева.

ТРЕТИЙ-ПЯТЫЙ ЗАКОНЫ ТЕПЛОВОГО КВАНТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ

Рассчитаем плотность потока квантового излучения на площадку dF коаксиальных цилиндрических газовых объемов, в которых выделяется мощность излучения: $P_1 = P_2 = P_3 = 700/3 = 233,3$ МВт. Принимаем параметры газовой среды, характерные для топки парового котла: концентрация частиц $\mu = 0,06$ г/м³; диаметр $d_r = 0,3$ мкм; плотность $\rho = 2 \cdot 10^3$ кг/м³; коэффициент ослабления среды $k = 1,5\mu / (d_r\rho) = 0,15$. Результаты расчета плотностей потоков тепловых излучений коаксиальных цилиндрических газовых объемов от всех атомов на площадку dF (см. рисунок) по первому закону теплового квантового излучения газовых объемов:

$$q_{F_1dF} = q_{F_2dF} = q_{F_3dF} = \frac{\Phi_{F_1dF} \cdot P_1}{F_{dF}} e^{-kl_1} = \frac{\Phi_{F_2dF} \cdot P_2}{F_{dF}} e^{-kl_2} = \frac{\Phi_{F_3dF} \cdot P_3}{F_{dF}} e^{-kl_3} =$$

$$= (0,0003815 \cdot 233,3 \cdot 10^3 / 0,25) e^{-0,15 \cdot 7,8} = 110 \text{ кВт/м}^2,$$

где $l_1 = l_2 = l_3$ – средняя длина пути квантов от всех атомов 1–3 цилиндрических газовых объемов (см. рисунок).

Среднюю длину пути квантов от всех атомов l_{cp} (см. рисунок) определяли как среднеарифметическое расстояние от элементарных площадок, из которых состоит поверхность цилиндрического излучающего объема, до расчетной площадки dF [8–11], а также как среднюю длину пути квантов от всех излучающих атомов цилиндрического газового объема до расчетной площадки. Средняя длина пути квантов от всех атомов любого изотермического коаксиального цилиндрического объема равна среднеарифметическому расстоянию от оси симметрии коаксиальных цилиндрических объемов до расчетной площадки dF .

Результат расчета по формуле (5) свидетельствует еще о двух законах квантового излучения коаксиальных излучающих и поглощающих цилиндрических газовых объемов, из которых состоят электрическая дуга и факел.

Третий закон: «Средняя длина пути квантов от всех атомов коаксиальных цилиндрических газовых объемов до расчетной площадки равна среднеарифметическому расстоянию от оси симметрии цилиндрических объемов до расчетной площадки»:

$$l_{cp} = l_1 = l_2 = l_3 = \frac{\sum_{j=1}^{10 \cdot 10^3} \ell_j}{10 \cdot 10^{30}},$$

где ℓ_j – расстояние от каждого из $10 \cdot 10^{30}$ j -го атома газовых объемов 1–3 до расчетной площадки (см. рисунок).

Четвертый закон: «Плотности потоков квантовых излучений, падающих от изохорных коаксиальных цилиндрических газовых объемов на расчетную площадку, равны»:

$$q_{F_1dF} = q_{F_2dF} = q_{F_3dF}.$$

Суммарная плотность потоков квантовых излучений, падающих от трех коаксиальных цилиндрических газовых объемов на площадку dF , определяется согласно принципу суперпозиции:

$$q_{FdF} = \sum_{i=1}^3 q_{F_i dF} = 330 \text{ кВт/м}^2. \quad (8)$$

Допустим, что мощность квантового излучения 700 МВт выделяется в одном из цилиндрических газовых объемов (например, в третьем). Найдем плотность потока излучения третьего цилиндрического газового объема на площадку dF :

$$q_{F_3 dF} = \frac{\varphi_{dFF_3} \cdot P_3}{F_{dF}} = (0,0003815 \cdot 700 \cdot 10^3 / 0,25) e^{-0,15 \cdot 7,8} = 330 \text{ кВт/м}^2. \quad (9)$$

Пятый закон теплового квантового излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов выводится из результатов расчетов по формулам (8) и (9): «Суммарная плотность потоков квантовых излучений, падающих на расчетную площадку от нескольких излучающих и поглощающих цилиндрических газовых объемов, равна плотности потока квантового излучения коаксиального цилиндрического газового объема малого диаметра на расчетную площадку при мощности излучения, выделяющейся в цилиндрическом газовом объеме малого диаметра, равной суммарной мощности излучений, выделяющейся во всех коаксиальных цилиндрических газовых объемах, излучающих на расчетную площадку»:

$$q_{F_3 dF} = \sum_{i=1}^3 q_{F_i dF} \cdot$$

Это очень важный закон квантового излучения коаксиальных излучающих и поглощающих цилиндрических газовых объемов, из которых состоят электрическая дуга и факел, так как он подтверждает обоснованность перехода от трех-, четырехкратных интегралов к однократному интегрированию при расчете локальных угловых коэффициентов квантового излучения цилиндрических газовых объемов на элементарные площадки и позволяет вывести аналитические выражения для определения локальных угловых коэффициентов квантового излучения цилиндрических газовых объемов малого диаметра (цилиндрического линейного источника излучения) на элементарные площадки при любом их взаимном пространственном положении [5–7].

Из первого-пятого законов теплового квантового излучения цилиндрических газовых объемов синтезирован следующий вывод: «При моделировании факела и электрической дуги коаксиальными цилиндрическими газовыми объемами, слоями результаты расчета теплообмена включают в себя объемное квантовое излучение и поглощение всех слоев факела и электрической дуги и их теплообмен со всеми поверхностями нагрева».

Преимущества моделирования факела цилиндрическими газовыми объемами:

1. Цилиндрические газовые объемы – это геометрические фигуры, вписывающиеся в факел, создаваемый одиночной горелкой и представляющий собой эллипсоид вращения, и больше заполняющие объем эллипсоида вращения, чем прямоугольные параллелепипеды, которыми традиционно моделируется факел.

2. При расчетах теплообмена излучением цилиндрическими поглощающими и излучающими газовыми объемами моделируется объемное квантовое излучение факела, а в случае моделирования прямоугольными параллелепипедами – поверхностное излучение факела гранями параллелепипеда.

3. В цилиндр, используемый для моделирования факела, могут быть вписаны сотни и тысячи коаксиальных цилиндрических газовых объемов, которыми моделируются квантовое излучение и поглощение внутренних газовых слоев факела. При этом получают одинаковый результат расчета теплообмена излучением и тем самым заменяют множество излучающих и поглощающих цилиндрических газовых слоев одним цилиндрическим газовым объемом. Таким образом, от декларации расчета объемного излучения факела при его моделировании прямоугольными параллелепипедами переходят к реальному расчету объемного квантового излучения факела при его моделировании цилиндрами.

Все пять законов зарегистрированы в виде научного открытия и объединяются общим понятием инвариантности (одинаковости) квантовых излучений изотермических коаксиальных цилиндрических газовых неионизированных и ионизированных излучающих объемов, слоев, образующихся при факельном сжигании газообразного, жидкого, пылевидного топлива и горении электрической дуги в парах металлов при атмосферном давлении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В конце 1990-х гг. была подтверждена выдвинутая автором в 1979–1982 гг. гипотеза о возможности моделирования множества изотермических коаксиальных газовых ионизированных излучающих слоев, из которых состоит электрическая дуга, излучающим центральным изотермическим коаксиальным цилиндрическим газовым ионизированным слоем дуги осью симметрии дуги. Излучением центрального коаксиального излучающего цилиндрического ионизированного газового объема столба дуги, или осью столба, можно моделировать квантовое излучение всего этого столба. Таким образом, гипотеза, выдвинутая в 1979–1982 гг. получила свое научное подтверждение с открытием законов теплового квантового излучения изотермических коаксиальных цилиндрических газовых неионизированных и ионизированных излучающих объемов, образующихся при факельном сжигании газообразного, жидкого, пылевидного топлива и горении электрической дуги в парах металлов при атмосферном давлении.

Способ передачи тепла от источников энергии к поверхностям нагрева, то есть теплообмен квантовым излучением и его зависимость от мощности и размеров источников излучения, у факельных и электродуговых печей, топков паровых котлов, камер сгорания газотурбинных установок схож. На этом явлении автором построена единая методология расчета теплообмена квантовым излучением в факельных и дуговых печах, топках, камерах сгорания, позволяющая объединить два различных физических явления, а именно выделение тепловой энергии при сгорании топлива и выделение ее при протекании электрического разряда в газе, на основе общего для этих двух явлений результата преобразования энергии топлива и электрической дуги в энергию потока квантового теплового излучения.

Модель факела в виде объема, состоящего из множества соосных излучающих и поглощающих цилиндрических газовых объемов, слоев используется при расчете теплообмена квантовым излучением в факельных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок [1]. Результаты расчетов хорошо согласуются с результатами измерений тепловых потоков и температур в печах, топках, камерах сгорания [2]. Важнейшая особенность разработанного метода расчета теплообмена квантовым излучением (по сравнению с существующими) состоит в том, что факел, то есть активный объем печей, топков, камер сгорания, в котором протекает реакция горения топлива, отделен от пассивных газовых объемов, где находятся продукты горения. Создан

метод расчета мощности излучения каждого атома в каждом из активных объемов, составляющих факел, и, что еще важнее, получены аналитические выражения, связывающие энергетические, геометрические, оптические параметры факела и поверхностей нагрева и учитывающие излучение каждого атома факела на поверхность нагрева.

Преимущества предлагаемого метода расчета теплообмена в факельных печах заключаются в следующем. При моделировании факела изотермическими коаксиальными цилиндрическими объемами (так же, как при моделировании электрических дуг коаксиальными цилиндрическими газовыми ионизированными объемами) можно абстрагироваться от температуры факела и дуги как основного параметра при расчетах теплообмена квантовым излучением в печах и топках. Схожесть происходящих в электрической дуге и факеле физических процессов, а именно преобразование электрической энергии в дуге и энергии топлива в факеле в энергию потока квантов излучения [12–15], позволяет идентифицировать эти два физических явления и применять одинаковые аналитические выражения при расчетах теплообмена излучением (в частности, для вычисления плотностей потоков квантовых излучений дуги и факела на расчетные площадки).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань. 2014. 384 с.
2. Макаров А.Н. Распределение тепловых потоков в топке парового котла ТГМП-204 // *Электрические станции*. 2003. № 1. С. 20–25
3. Makarov A.N. Theory of radiative Heat Exchange in furnaces, fire boxes, combustion chambers is replenished by four new laws // *Science Discovery*. 2014. Vol. 2. № 2. pp. 34–42.
4. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат. 1991. 432 с.
5. Макаров А.Н. Определение угловых коэффициентов излучения линейного источника на параллельные и перпендикулярные плоскости // *Теплоэнергетика*. 1997. № 1. С. 65–68.
6. Макаров А.Н. Определение угловых коэффициентов излучения линейного источника на произвольно расположенные плоскости // *Теплоэнергетика*. 1998. № 12. С. 58–62.
7. Макаров А.Н. Определение угловых коэффициентов излучения линейного источника и факела топок паровых котлов // *Теплоэнергетика*. 2000. № 8. С. 63–66.
8. Блох А.Г. Тепловое излучение в котельных установках. Л.: Энергия. 1967. 326 с.
9. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидравлическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат. 1990. 367 с.
10. Аметистов Е.В. Основы теории теплообмена. М.: МЭИ. 2000. 247 с.
11. Теплотехнические расчеты металлургических печей / под ред. А.С. Телегина. М.: Металлургия. 1993. 368 с.
12. Макаров А.Н. Закономерности теплообмена газовых слоев факела и экранов топок паровых котлов. Ч. 1. Геометрическая и физическая модель факела как источника теплового излучения // *Теплоэнергетика*. 2014. № 9. С. 26–32.
13. Макаров А.Н. Закономерности теплообмена газовых слоев факела и экранов топок паровых котлов. Ч. 2. Законы излучения газовых слоев и разработанная на их основе методика расчета теплообмена в печах, топках, камерах сгорания // *Теплоэнергетика*. 2014. № 10. С. 24–33.

14. Макаров А.Н. Закономерности теплообмена газовых слоев факела и экранов топок паровых котлов. Ч. 3. Примеры расчета теплообмена в факельных печах и топках паровых котлов // *Теплоэнергетика*. 2014. № 11. С. 46–54.

15. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установках. М. – Вологда: Инфра-Инженерия. 2022. 452 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника», ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Математические доказательства законов квантового теплового излучения газовых объемов. Часть I. Законы квантового теплового излучения цилиндрических газовых объемов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 2 (18). С. 44–54.

MATHEMATICAL EVIDENCE OF THE LAWS OF QUANTUM THERMAL RADIATION OF GAS VOLUMES. PART I. LAWS OF QUANTUM THERMAL RADIATION OF CYLINDRICAL GAS VOLUMES

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The description of the first law of quantum thermal radiation of ionized and non-ionized gas volumes of any shape and size is given. A mathematical description of the derivation of the second-fifth laws of quantum thermal radiation of cylindrical gas volumes is given. It is indicated that cylindrical gas volumes can simulate the thermal radiation of electric arcs of electric arc steelmaking, flare heating furnaces, furnaces of steam boilers of power plants, flares of combustion chambers of gas turbine plants of power plants, gas turbine engines.

Keywords: quantum, laws, thermal radiation, gas volumes, torch, electric arc, furnaces, furnaces, combustion chambers.

REFERENCES

1. Makarov A.N. *Teploobmen v elektrodugovyh i fakel'nyh metallurgicheskikh pechah i energeticheskikh ustanovkakh* [Heat transfer in electric arc and flare metallurgical furnaces and power plants]. St.-Petersburg: Lan. 2014. 384 p.
2. Makarov A.N. Distribution of heat flows in the furnace of the steam boiler TGMP-204. *Elektricheskie stanzii*. 2003. No. 1, pp. 20–25. (In Russian).
3. Makarov A.N. Theory of radiative Heat Exchange in furnaces, fire boxes, combustion chambers are replenished by four new laws. *Science Discovery*. 2014. Vol. 2. No. 2, pp. 34–42.

4. Bloch A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. Teploobmen izlucheniem [Heat transfer by radiation]: Handbook. Moscow: Energoatomizdat. 1991. 432 p.
5. Makarov A.N. Determination of the angular coefficients of radiation of a linear source on parallel and perpendicular planes. *Teploenergetika*. 1997. No. 1, pp. 65–68. (In Russian).
6. Makarov A.N. Determination of the angular coefficients of radiation of a linear source on arbitrarily located planes. *Teploenergetika*. 1998. No. 12, pp. 58–62. (In Russian).
7. Makarov A.N. Determination of angular coefficients of radiation of a linear source and a torch of furnaces of steam boilers. *Teploenergetika*. 2000. No. 8, pp. 63–66. (In Russian).
8. Bloch A.G. Teplovoe izluchenie v kotel'nyh ustanovkakh [Thermal radiation in boiler installations]. L.: Energy. 1967. 326 p.
9. Kutateladze S.S. Teploperedacha i gidravlichesкое soprotivlenie [Heat Transfer and Hydraulic Resistance]. Moscow: Energoatomizdat. 1990. 367 p.
10. Ametistov E.V. Osnovy teorii teploobmena [Fundamentals of the theory of heat transfer]. Moscow: MEI. 2000. 247 p.
11. Thermotechnical calculations of metallurgical furnaces [Tehnicheskie raschety metallurgicheskikh pechei] / ed. A.S. Telegin. Moscow: Metallurgy. 1993. 368 p.
12. Makarov A.N. Patterns of heat transfer of gas layers of a torch and screens of furnaces of steam boilers. P. 1. Geometrical and physical model of a torch as a source of thermal radiation. *Teploenergetika*. 2014. No. 9, pp. 26–32. (In Russian).
13. Makarov A.N. Patterns of heat transfer of gas layers of a torch and screens of furnaces of steam boilers. P. 2. Laws of radiation of gaseous layers and a method for calculating heat transfer in furnaces, fireboxes, combustion chambers developed on their basis. *Teploenergetika*. 2014. No. 10, pp. 24–33. (In Russian).
14. Makarov A.N. Patterns of heat transfer of gas layers of a torch and screens of furnaces of steam boilers. P. 3. Examples of calculation of heat transfer in torch furnaces and furnaces of steam boilers. *Teploenergetika*. 2014. No. 11, pp. 46–54. (In Russian).
15. Makarov A.N. Teploobmen v elektrodugovyh staleplavil'nyh i fabel'nyh nagrevatel'nyh pechah, topkakh parovyh kotlov, kamerah sgoraniya gazoturbinnnyh ustanovkakh [Heat transfer in electric arc steel-smelting and flare heating furnaces, furnaces of steam boilers, combustion chambers of gas turbine plants]. Moscow – Vologda: Infra-Engineering. 2022. 452 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N. Mathematical evidence of the laws of quantum thermal radiation of gas volumes. Part I. Laws of quantum thermal radiation of cylindrical gas volumes// Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 2 (18), pp. 44–54.

УДК 621.315.1

**ПРОБЛЕМА ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ
НА ПРОВОДАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
И МЕТОДЫ БОРЬБЫ С НИМ***Д.А. Никуленко, Л.С. Араратьян, А.В. Крупнов
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Никуленко Д.А., Араратьян Л.С.,
Крупнов А.В., 2023

Аннотация. Проведен анализ факторов, влияющих на возникновение гололедных отложений, и выявлены особенности гололедных образований на линиях электропередач. Описаны последствия аварий, произошедших в результате образования наледи на проводах. Рассмотрены устройства, системы, основные мероприятия, предназначенные для предотвращения гололедообразования. Описаны методы профилактики гололеда и борьбы с ним.

Ключевые слова: провода, воздушные линии электропередач, опора, гололед, наледь, обледенение проводов, методы борьбы с обледенением.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-2-55-63**ПРОБЛЕМА ОБЛЕДЕНЕНИЯ ПРОВОДОВ
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Линии электропередачи (ЛЭП) – это самая сложная и важная часть энергетической системы. Они предназначены для транспортировки электроэнергии от ее источников к потребителям. Важным звеном любой ЛЭП являются провода.

Одной из проблем при работе воздушных линий электропередач в разных частях страны выступает образование гололеда на проводах, что серьезно сказывается на надежности и бесперебойности работы линии. Такие климатические факторы, как ветер, высокая влажность, резкие перепады температуры воздуха оказывают негативное воздействие на провода, в результате чего возникает наледь. При длительном воздействии указанных неблагоприятных природных факторов на ЛЭП нарастает слой льда или снега толщиной 50–70 мм, из-за которого многократно утяжеляется конструкция. Рассмотрим пример: примем провод марки АС-185/43 диаметром 19,6 мм, длиной 1 км, массой 846 кг. На основе расчетов [1, 3] получено, что при толщине гололеда 20 мм масса провода становится в 3,7 раза больше, при толщине 40 мм – в 9 раз, при толщине 60 мм – в 17 раз. А если учесть, что ЛЭП имеет семь проводов (линия 330 кВ – 3 фазы с расщеплением на два провода и один грозозащитный трос) каждый длиной 1 км, то на выходе имеем общую массу около 22, 53 и 100 т соответственно, что приводит к обрыву проводов (рис. 1) и поломке металлических опор (рис. 2) [1, 3].

Появление гололедно-изморозевых отложений (ГИО) обуславливает дополнительные механические нагрузки на все элементы воздушных линий. Вследствие образования ГИО на ЛЭП под воздействием продолжительных порывов воздушных масс

провода начинают колебаться в разные стороны или, говоря иначе, возникает процесс резонансной «пляски».

«Пляска» проводов может достигать амплитуды около 12–14 м и характеризоваться длиной волны, равной длине пролета линии между опорами. При таких колебаниях конструктивные элементы воздушных линий имеют фактическую нагрузку, которая во много раз превышает расчетную, из-за чего возникают повреждения на участках ЛЭП. Если же описанный выше процесс колебаний происходит достаточно длительное время, то это приводит к обрыву проводов, поскольку появляется одностороннее тяжение на промежуточные опоры, которые разрушаются от воздействия на них возросших механических нагрузок (рис. 2) [2]. Такого рода аварии наносят колоссальный удар по экономике. На восстановление ЛЭП уходит немалое количество дней и тратится огромное количество сил. Для устранения происшествий подобного масштаба в среднем потребуется во много раз больше времени, чем для ликвидации аварий, вызванных другими причинами. В конечном счете все потребители понесут существенные потери. Восстановление оборванных проводов (а тем более опор) – очень трудоемкий процесс, который требует значительных финансовых затрат. Следовательно, проблема борьбы с гололедообразованием на ЛЭП является крайне актуальной [1].



Рис. 1. Обледенение проводов [1]



Рис. 2. Поломка металлической опоры [1]

Для поиска решений описанной проблемы проводятся различные исследования и испытания, демонстрируются новые разработки и изобретения, способы и устройства, которые способны предотвратить появление гололеда на ЛЭП. Указанная проблема характерна не только для России, но и для многих других стран, расположенных в северных широтах, следовательно, требует внимания ученых различных стран [3]. Например, в Тверской области в 2021 г. из-за продолжительных ледяных дождей обрушилась опора напряжением 35 кВ, из-за чего остались без электричества сотни населенных пунктов и тысячи потребителей [6]. Один из наиболее масштабных случаев данного типа аварии произошел в Канаде в 1988 г. На территории в несколько тысяч квадратных километров в течение 80 ч непрерывно шел ледяной дождь. Из-за образования значительного количества льда на проводах обрушились многие линии высокого напряжения и разрушилось около 1000 опор ЛЭП. В результате более 4 млн жителей на

несколько дней осталось без электричества, а общий экономический ущерб превысил 5 млрд долларов [2].

МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ГОЛОЛЕДНЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ

Рассмотрим наиболее эффективные методы борьбы с обледенением проводов на воздушных ЛЭП. Их принцип действия состоит в том, чтобы не допустить образования наледи, уменьшить или полностью удалить ледяные отложения.

Механический метод подразумевает использование специального оборудования, с помощью которого сбивают с проводов образовавшуюся наледь. Например, возникший на линии лед сбивают длинными шестами, ударяя ими с боку (благодаря этому вызывают качание проводов и, следовательно, падение льда на землю) (рис. 3). Указанный способ широко известен и является одним из самых примитивных. Однако у данного метода есть минусы:

- необходим безопасный доступ к ЛЭП, что требует снятия напряжения с участка;
 - подходит только для устранения обледенения, но не препятствует его появлению, то есть устраняются последствия, а не причины явления;
 - требуется много времени и рабочих;
 - применяется только на коротких участках.
- Все эти недостатки говорят о том, что механический метод нецелесообразен.



Рис. 3. Сбивание наледи с проводов ЛЭП [1]

В наше время найден более современный и удачный метод удаления льда с проводов ЛЭП – избавление от гололедных отложений с помощью нагревания фазных проводов повышенным переменным или постоянным током (зависит от сечения провода) на протяжении достаточно большого временного промежутка (порядка 100 мин), вызывающим плавку льда. Но и этот метод, к сожалению, имеет свои недостатки: расходуется много энергии, приходится отключать потребителей от линии на довольно длительное время.

Электротермический метод устранения льда с проводов – это по сути нагрев проводов током с помощью электричества. Он позволяет предотвратить появление льда в принципе или расплавить его, если образовалась наледь. Если метод применяют для профилактики, то прогрев проводов осуществляется искусственным способом (за счет изменения силы тока в большую сторону до уровня, при котором провода будут иметь температуру выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$). О профилактическом подогреве линий нужно задумываться еще до появления наледи.

Если с помощью электротермического метода нужно удалить уже появившиеся на проводах гололедные отложения, то процесс реализуется через увеличение тока ЛЭП искусственным способом. Нагрев проводов происходит с помощью постоянного или переменного тока частотой 50 Гц и температурой от 100 до 130 $^{\circ}\text{C}$. Можно облегчить задачу, если осуществить короткое замыкание двух проводов, но при этом абсолютно все потребители должны быть отключены от сети. Схема для плавки гололеда изображена на рис. 4.

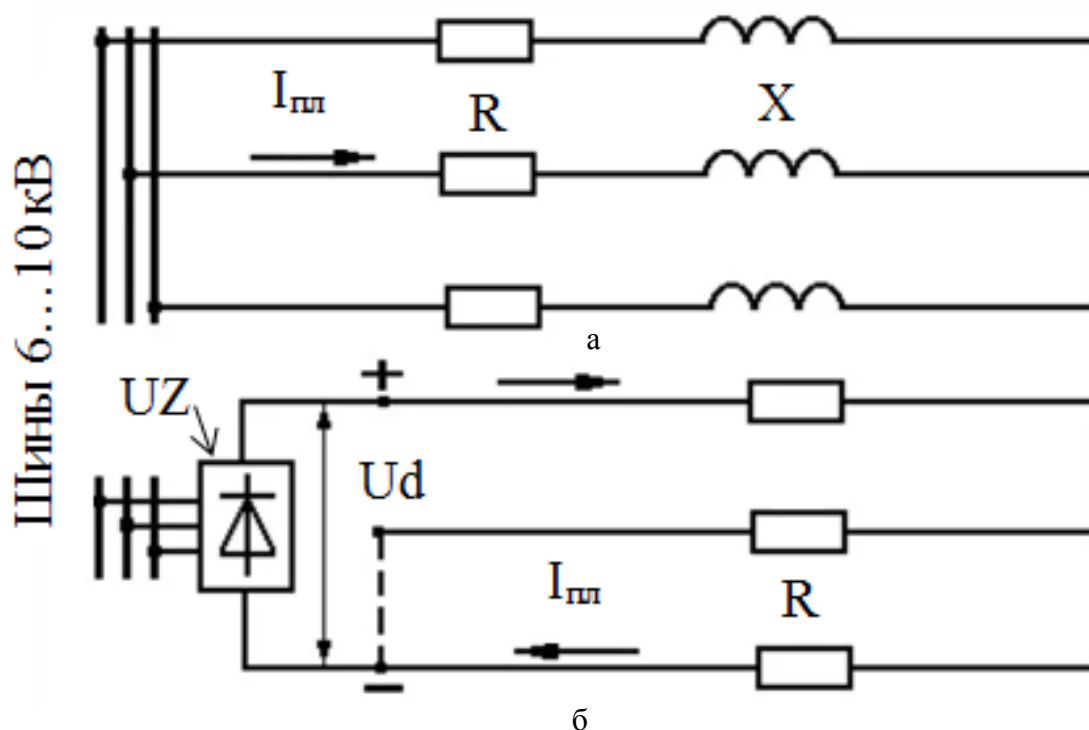


Рис. 4. Принципиальная схема для плавки гололеда током:

а – переменным; б – постоянным;

R и X – активное и индуктивное сопротивление линии соответственно;

UZ – выпрямительное устройство; U_d – среднее значение выпрямленного напряжения;

$I_{пл}$ – ток плавки гололеда

Для плавки наледи переменным током характерна особенность: она возможна исключительно на линиях, напряжение которых ниже чем 220 кВ и провода которых имеют сечение менее 240 мм^2 . У воздушных линий с указанными параметрами и более высокими плавление льда осуществляется источниками питания гораздо большей

мощности. Преимуществом рассмотренного способа является снижение энергозатрат. К недостаткам описанного метода следует отнести необходимость в постоянном подогреве проводов ЛЭП, чтобы не появлялся гололед; необходимость применения определенных схем питания, которые позволят обеспечить бесперебойную подачу электричества потребителям; значительную стоимость источников высокочастотного тока большой мощности.

Устранение наледи электромеханическим методом представляет собой один из новых способов решения проблемы. В данном случае удаление ГИО происходит с помощью воздействия на лед специального электромеханического процесса: на линию начинает подаваться ток конкретной формы и частоты через определенные промежутки времени (импульсами). С помощью него создается сила Ампера, которая оказывает влияние на провода и вызывает механические колебания, призванные предупреждать возникновение наледи и разрушать ледяную корку. Преимущества метода: не нужно отключать потребителей от электричества; затрачивается меньше времени и энергии, чем при электротермическом способе удаления ГИО.

Электромеханический метод осуществляется с помощью специального устройства, включающего в себя ударный элемент, непосредственно связанный с проводом. Этот элемент представляет собой рамку прямоугольной формы, надетую на провод, с двух противоположных сторон рамки находятся пластинчатые постоянные магниты, намагниченные аксиально и обращенные друг к другу разноименными полюсами. При этом магниты свободно обхватывают провод и могут смещаться относительно друг друга, то есть имеют скользящую посадку. Две оставшиеся стороны прямоугольной рамки изготавливаются из дюралюминия и имеют вид пластин, которые крепятся к магнитам с помощью винтов, ввернутых в заармированные в магниты резьбовые втулки, и соединяют их.

Принцип действия рассматриваемого устройства реализуется следующим образом. Ударный элемент автоматически и непрерывно создает колебания проводов в режиме вибрации, то есть посредством воздействия вибрации на провод достигается непрерывное его очищение от воды, чем предотвращается возникновение льда. Кроме того, описанное устройство имеет два режима (многофункционально в отличие от других способов): удаление воды с помощью вибрации и устранение льда благодаря ударным и встряхивающим воздействиям. Механизм можно настроить и для работы в профилактическом режиме, при этом не придется отключать потребителей от сети. Устройство достаточно мощное; предполагается, что оно способно эффективно бороться с обледенениями значительных размеров. Использование механических колебаний для удаления льда значительно уменьшает время проведения очистительных процедур.

Физико-химический метод заключается в нанесении специальных растворов на провода, температура замерзания которых гораздо ниже, чем воды (рис. 5). Суть метода – изготовление таких средств, которые обладают низким уровнем адгезии к жидким водным средам, снегу и льду. Чтобы максимально предотвратить сцепку проводов и воды (льда), стали создавать супергидрофобные покрытия. Иными словами, при использовании физико-химического метода наледи на проводах попросту не будет образовываться. Это отличает данный способ от других известных методов.

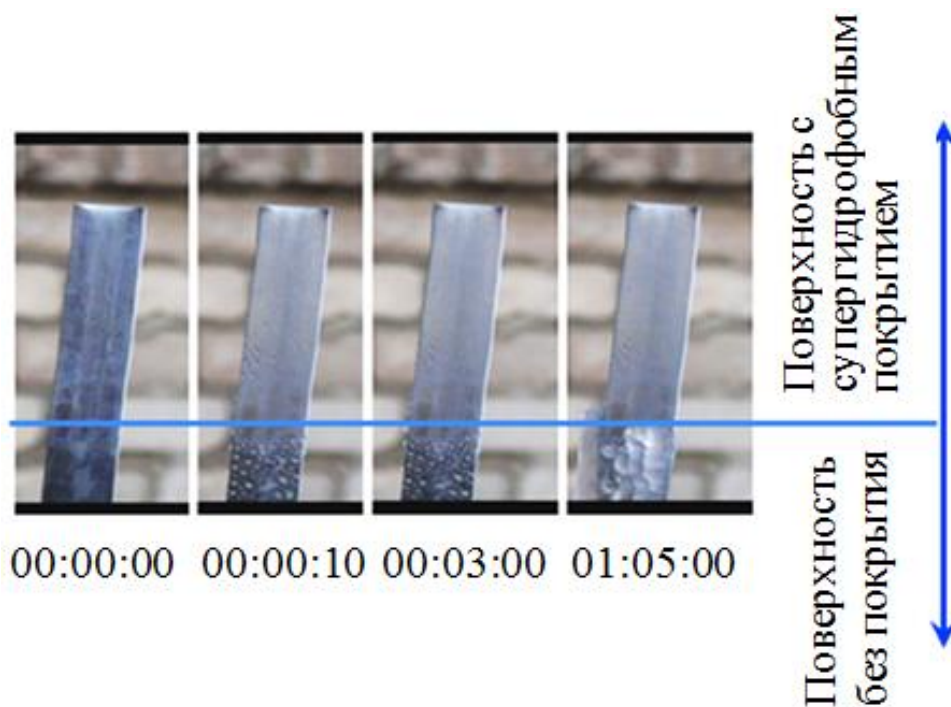


Рис. 5. Испытание супергидрофобных покрытий [1]

Последние результаты исследований позволяют считать, что появился физико-химический способ устранения ГИО с проводов ЛЭП. По эффективности он во много раз превосходит все ранее изученные методы. Одним из его главных преимуществ выступает наибольшая экономическая выгода перед описанными ранее способами. В результате получаем, что именно физико-химический метод более перспективный на данный момент. Однако он обладает одним очень существенным недостатком: срок действия таких жидкостей относительно мал, а постоянно обновлять состав на сотни километров проводов ЛЭП не представляется возможным [1].

Простейшие методы удаления гололедных образований, при которых задействуются роботы, предполагают использование скребков, роликов или резаков, прикрепленных к веревке. Главное ограничение для применения этих методов: линии должны быть доступны с земли. Пример использования робота для удаления наледи с проводов: компания Manitoba Hydro использует алюминиевое роликовое колесо для удаления льда с ЛЭП, находящихся под напряжением 12 и 25 кВ; этот метод был усовершенствован за счет автоматических роботов. Один из таких роботов, Remotely Operated Vehicle (ROV), был разработан в Научно-исследовательском институте производителя электроэнергии Hydro-Quebec. Этот робот, прочный, легкий и компактный, обладает высокой тяговой силой, что позволяет ему выполнять сложные задачи. Он был успешно протестирован на проводах линий напряжением 315 кВ. Его электронная схема защищена от электромагнитных помех, а радиус действия составляет 1 км. Инструмент для соскабливания льда состоит из набора стальных лезвий, установленных на ROV (рис. 6). Робота, вероятно, придется устанавливать с вертолета или изолированного грузовика-стрелы, поскольку обледенелые конструкции опоры мешают электромонтажникам подниматься по ним, чтобы добраться до проводов [7].



Рис. 6. Прототип робота ROV

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема образования наледи на проводах ЛЭП остается одной из самых актуальных в электроэнергетике. С каждым годом различные компании и организации стараются придумать наиболее эффективный способ борьбы с гололедом, так как при авариях наносится огромный ущерб потребителям и на ликвидацию таких последствий тратится очень много сил и времени.

Электротермический метод борьбы с обледенением проводов эффективен, если реализовывать его заранее, ориентируясь на метеорологический прогноз погоды.

Перспективными методами борьбы с обледенением являются физико-химический и электромеханический, одним из существенных преимуществ которых выступает то, что их использование возможно без отключения потребителей от сети [1].

В настоящее время проводятся эксперименты, предназначенные установить действенность и полезность применения роботов в очистке проводов от наледи. Пока их использование требует наличия оператора. Отметим, что развитые технологии позволят роботу во время удаления льда с ЛЭП также осуществлять дефектоскопию проводов, что увеличит экономическую выгоду от применения роботов и надежность ЛЭП благодаря предупреждению аварийных ситуаций, возникающих из-за обрыва проводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паскарь И.Н., Чернослив А.А., Скворцов О.Н. Борьба с обледенением проводов на линиях электропередач. URL: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2015/energ/pages/Articles/2/Chernosliv.pdf> (дата обращения: 22.04.2023).
2. Фурсанов М.И., Фарино А.А., Горудко П.С. Гололедные аварии на ЛЭП – причины появления и способы предотвращения // *Энергия и менеджмент*. 2017. № 2. С. 25–29.
3. Санакулов А.Х. Проблемы обледенения электрических и контактных сетей / Казанский федеральный университет // *Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация*. 2016. № 2 (69). URL: <https://kpfu.ru/portal/docs/F83065962/Sanakulov.pdf> (дата обращения: 22.04.2023).

4. Баранов А.П. Методы раннего предупреждения и борьбы с гололедными отложениями на проводах ЛЭП // *Актуальные вопросы современной науки*. 2011. № 18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-rannego-preduprezhdeniya-i-borby-s-gololednymi-otlozheniya-mi-na-provodah-lep> (дата обращения: 22.09.2022).
5. Акбаров И.К. Проблема борьбы с гололедообразованием на воздушных линиях передач // *Science Time*. 2019. № 7 (67). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problema-borby-s-gololedoborazovaniem-na-vozdushnyh-liniyah-peredach> (дата обращения: 22.04.2023).
6. Макаров П. В Тверской области под тяжестью льда рухнула опора ЛЭП [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tverigrad.ru/publication/v-tverskojj-oblasti-pod-tyazhestyu-lda-rukhnula-opora-lehp/?ysclid=18c5rksno108948279> (дата обращения: 23.04.2023).
7. Farzaneh M. [et al.]. Systems for prediction and monitoring of ice shedding, anti-icing and de-icing for power line conductors and ground wires. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Systems-for-prediction-and-monitoring-of-ice-and-Farzaneh-Jakl/c4caf03cacbd35d4a6d2873e26fb882219b59dfd> (дата обращения: 23.04.2023).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НИКУЛЕНКО Дмитрий Андреевич – студент 4-го курса кафедры «Электроснабжение и электротехника», ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: nikulenko_01@mail.ru

АРАРАТЬЯН Любовь Сергеевна – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение и электротехника», ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: liuba.araratyan@yandex.ru

КРУПНОВ Андрей Владимирович – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение и электротехника», ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: AV.Krupnov@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Никуленко Д.А., Араратьян Л.С., Крупнов А.В. Проблема гололедообразования на проводах воздушных линий электропередач и методы борьбы с ним // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 2 (18). С. 55–63.

THE PROBLEM OF ICE FORMATION ON OVERHEAD POWER LINES WIRES AND METHODS OF COMBATING IT

D.A. Nikulenko, L.S. Araratyan, A.V. Krupnov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The analysis of the factors influencing the occurrence of icy deposits is carried out, and the features of icy formations on power lines are revealed. The consequences of accidents that occurred as a result of the formation of ice on the wires are given. Devices, systems, and basic measures designed to prevent ice formation are considered. The methods of prevention and control of ice are described.

Keywords: wires, overhead power lines, power line support, ice, frost, icing of wires, methods of de-icing.

REFERENCES

1. Paskar I.N., Prunes A.A., Skvortsov O.N. The fight against icing of wires on power lines. URL: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2015/energ/pages/Articles/2/Chernosliv.pdf> (date of access: 22.04.2023). (In Russian).
2. Fursanov M.I., Farino A.A., Gorudko P.S. Icy accidents at power lines – causes of occurrence and methods of prevention. *Energia i menegment*. 2017. No. 2, pp. 25–29. (In Russian).
3. Sanakulov A.H. Problems of icing of electrical and contact networks. *Social'no-ekonomicheskie I tehicheskie systemy: issledovanie, proektirovanie, optimizatsiya*. 2016. No. 2 (69). URL: <https://kpfu.ru/portal/docs/F83065962/Sanakulov.pdf> (date of access: 22.04.2023). (In Russian).
4. Baranov A.P. Methods of early warning and control of icy deposits on power lines. *Aktual'nye voprosy sovremennoy nauki*. 2011. No. 18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-rannego-preduprezhdeniya-i-borby-s-golodnymi-otlozheniyami-na-provodah-lep> (date of access: 22.04.2023). (In Russian).
5. Akbarov I.K. The problem of combating ice formation on overhead transmission lines. *Science Time*. 2019. No. 7 (67). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problema-borby-s-golodborazovaniem-na-vozdushnyh-liniyah-peredach> (date of access: 23.04.2023). (In Russian).
6. Makarov P. In the Tver region, a power line support collapsed under the weight of ice [Electronic resource]. – Access mode: <https://tverigrad.ru/publication/v-tverskojj-oblasti-pod-tyazhestyu-lda-rukhnula-opora-lehp/?ysclid=18c5rksno108948279> (date of access: 23.04.2023). (In Russian).
7. Farzaneh M. [et al.]. Systems for forecasting and monitoring ice formation, protection against icing and de-icing of power transmission lines and grounding wires. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Systems-for-prediction-and-monitoring-of-ice-and-Farzaneh-Jakl/c4caf03cacbd35d4a6d2873e26fb882219b59dfd> (date of access: 23.04.2023).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

NIKULENKO Dmitry Andreevich – 4th year Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: nikulenko_01@mail.ru

ARARATYAN Lyubov Sergeevna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: liuba.aratyan@yandex.ru

KRUPNOV Andrey Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: AV.Krupnov@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Nikulenko D.A., Araratyan L.S., Krupnov A.V. The problem of ice formation on overhead power lines wires and methods of combating it // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 2 (18), pp. 55–63.

УДК 629.7.052

О ЦЕНТРАХ СИММЕТРИИ ВЫПУКЛОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ТЕЛА

Ал.А. Шум¹, А.М. Ветошкин²

¹Тверской государственной технической университет (г. Тверь, Тверская область)

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

© Шум Ал.А., Ветошкин А.М., 2023

Аннотация. Рассмотрено введенное авторами ранее понятие центра n -симметрии пространственного тела. Указано, что частными случаями этого общего понятия являются центр s -симметрии (центр 0-симметрии) и центр c -симметрии (центр 1-симметрии). Установленный ранее критерий совпадения центра s -симметрии выпуклого пространственного тела с началом координат перенесен на общий случай n -симметрии.

Ключевые слова: симметрия, c -симметрия, s -симметрия, n -симметрия, центр симметрии, функция плотности, выпуклое тело, масса, центр масс, электрическая машина.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-2-64-72

ВВЕДЕНИЕ

Многообразие методов и технологий механической и физико-технической обработки деталей машин представлено в работах [1–13]. Выбор из этого многообразия тех или иных конкретных методов или технологий в каждом отдельном случае может зависеть от характера распределения массы внутри обрабатываемой детали. Так, например, такое распределение важно учитывать при изготовлении и балансировке вращающихся деталей электрических машин, качество исполнения которых обуславливает длительность их безаварийной работы.

Распределение массы внутри детали описывает соответствующая функция плотности, поэтому представляется естественным изучение свойств функции плотности и прежде всего тех из них, которые связаны с каким-либо видом симметрии. В работах [14–20, 25–27] рассматривались вопросы симметрии функции плотности, зависящей от двух переменных, и в зависимости от этого изучались плоские детали (которые в рамках определений из [16] представляют собой *пластины*). В статьях [21–24, 28] разбираемая функция плотности обуславливается уже тремя переменными. Таким образом, в этих работах предметом изучения выступают объемные детали (то есть, согласно определениям из [28], *тела*).

Настоящая статья продолжает исследования симметрии пространственных тел. В работах [14–24] рассматривались два вида симметрии пространственных тел: s -симметрия и c -симметрия. В работе [28] было предложено общее определение n -симметрии пространственного тела, такое, что s -симметрия оказывается 0-симметрией (частным случаем n -симметрии, соответствующим значению $n = 0$), а c -симметрия – 1-симметрией

(частным случаем n -симметрии, соответствующим значению $n = 1$). В статье [24] был установлен достаточный критерий совпадения центра s -симметрии выпуклого пространственного тела с началом координат. В настоящей работе этот критерий переносится на общий случай n -симметрии (следует также отметить, что данный результат представляет собой в то же время перенос на случай функции трех переменных аналогичного результата, полученного в работе [27] для случая функции двух переменных).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБОСНОВАНИЯ

Рассматривается трехмерное евклидово пространство. Под *областью* понимается замкнутая область этого пространства, ограниченная некоторой поверхностью (которая называется *границей* этой области и также считается ее частью). Точки области, не лежащие на ее границе, являются *внутренними* точками этой области. Область считается *выпуклой*, если всякая прямая, проведенная через любую внутреннюю точку этой области, пересекает ее границу ровно в двух точках. Область V_1 называется *подобластью* области V , если $V_1 \subseteq V$, область V вместе с определенной в этой области непрерывной неотрицательной функцией (*функцией плотности*) называется *телом* D , подобласть области V вместе с соответствующим ограничением функции плотности – *подтелом* тела D .

Функцию плотности тела D будем записывать в виде $f(\rho, \varphi, \theta)$, считая заданной подходящую сферическую систему координат (отметим, что при переходе от одной системы координат к другой выражение функции $f(\rho, \varphi, \theta)$ через координаты изменяется, хотя сама функция, как функция точки, остается неизменной).

Если в пространстве заданы плоскость Π и тело D с областью V и функцией плотности $f(\rho, \varphi, \theta)$, то *моментом n -го порядка тела D относительно плоскости Π* называется

$$M_n(D) = \iiint_V (R(\rho, \varphi, \theta))^n f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta,$$

где $R(\rho, \varphi, \theta)$ – расстояние от точки (ρ, φ, θ) до плоскости Π .

Заметим, что значение момента $M_n(D)$ не зависит от выбора системы координат, поскольку функции $f(\rho, \varphi, \theta)$ и $R(\rho, \varphi, \theta)$ при заданной плоскости Π являются функциями точки тела D .

Отдельно следует рассмотреть моменты нулевого и первого порядков. Момент нулевого порядка тела D не зависит от плоскости Π и равен *массе* тела D :

$$M_0(D) = \iiint_V (R(\rho, \varphi, \theta))^0 f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta = \iiint_V f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta = m(D).$$

Момент первого порядка тела D относительно плоскости Π представляет собой *статический момент* тела D относительно плоскости Π :

$$M_1(D) = \iiint_V R(\rho, \varphi, \theta) f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta.$$

В соответствии с [28] плоскость является плоскостью n -симметрии тела D , если она делит тело D на два подтела – D_1 и D_2 – так, что $M_n(D_1) = M_n(D_2)$. Точка будет центром n -симметрии тела D , если всякая проведенная через нее плоскость – плоскость n -симметрии тела D . Вообще говоря, центр n -симметрии тела D существует не всегда. Согласно определениям из статьи [23], центр 0-симметрии тела D представляет собой *центр полумасс* этого тела, а центр 1-симметрии является его *центром масс*; при этом в той же статье показано, что центр масс тела D всегда существует, в то время как его центр полумасс может не существовать.

Предполагается, что переменные ρ , φ и θ функции $f(\rho, \varphi, \theta)$ могут меняться в следующих пределах: $0 \leq \rho < +\infty$, $-\infty < \varphi < +\infty$, $0 \leq \theta \leq \pi$. Принимается также, что эта функция имеет период 2π по переменной φ . Это значит, что равенство $f(\rho, \varphi, \theta) = f(\rho, \varphi + 2\pi, \theta)$ выполнено для любых значений ρ, φ и θ , принадлежащих соответствующей области определения (если изначально функция плотности найдена только для значений аргумента φ из некоторого промежутка длиной 2π , то она автоматически продолжается до периодической по переменной φ с периодом 2π).

Функцию углов сферической системы координат $F(\varphi, \theta)$ называем *центросимметричной*, если $F(\varphi, \theta) = F(\varphi + \pi, \pi - \theta)$ при каком угодно значении φ и каком угодно $\theta \in [0; \pi]$. В силу этого определения при любых значениях φ и любом $\theta \in [0; \pi]$

$$F(\varphi, \theta) = F(\varphi + \pi, \pi - \theta) = F((\varphi + \pi) + \pi, \pi - (\pi - \theta)) = F(\varphi + 2\pi, \theta),$$

то есть центросимметричная функция имеет период 2π по переменной φ .

Лемма. Пусть начало сферической системы координат является внутренней точкой некоторой выпуклой области V тела D с функцией плотности $f(\rho, \varphi, \theta)$, $r(\varphi, \theta)$ – расстояние от данного начала координат до границы области вдоль луча,

определяемого углами φ и θ , и функция этих углов $F_n(\varphi, \theta) = \int_0^{r(\varphi, \theta)} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^{n+2} d\rho$

центросимметрична. Тогда тело D имеет центр n -симметрии в начале координат.

Доказательство. Пусть выполнены условия леммы и плоскость Π , проведенная через начало координат, делит тело D на два подтела – D_1 и D_2 – с областями V_1 и V_2 соответственно. Расстояние $R(\rho, \varphi, \theta)$ от точки (ρ, φ, θ) до плоскости Π при заданных углах φ и θ пропорционально ρ , что очевидно. Кроме того, при каждом фиксированном ρ функция $R(\rho, \varphi, \theta)$ углов φ и θ есть функция центросимметричная (это следует из симметрии плоскости Π относительно начала координат). Таким образом, $R(\rho, \varphi, \theta) = \rho \cdot k(\varphi, \theta)$, где $k(\varphi, \theta)$ – коэффициент пропорциональности, представляющий собой центросимметричную функцию углов φ и θ .

Вычисление момента n -го порядка тела D_1 относительно плоскости Π будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
M_n(D_1) &= \iiint_{V_1} (R(\rho, \varphi, \theta))^n f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta = \\
&= \iiint_{V_1} (\rho \cdot k(\varphi, \theta))^n f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta = \\
&= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\mathcal{G}(\varphi)} k^n(\varphi, \theta) \sin \theta \cdot d\theta \int_0^{r(\varphi, \theta)} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^{n+2} d\rho = \\
&= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\mathcal{G}(\varphi)} k^n(\varphi, \theta) \sin \theta \cdot F_n(\varphi, \theta) d\theta,
\end{aligned}$$

где $\mathcal{G}(\varphi)$ – угол между лучом, представляющим собой пересечение полуплоскости $\varphi = const$ с плоскостью Π , и вертикальной осью сферической системы координат (легко видеть, что $\mathcal{G}(\varphi + \pi) = \pi - \mathcal{G}(\varphi)$ при любом значении угла φ).

С другой стороны, момент n -го порядка тела D_2 относительно плоскости Π может вычисляться так:

$$\begin{aligned}
M_n(D_2) &= \iiint_{V_2} (R(\rho, \varphi, \theta))^n f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta = \\
&= \iiint_{V_2} (\rho \cdot k(\varphi, \theta))^n f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta = \\
&= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\mathcal{G}(\varphi)}^{\pi} k^n(\varphi, \theta) \sin \theta \cdot d\theta \int_0^{r(\varphi, \theta)} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^{n+2} d\rho = \\
&= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\mathcal{G}(\varphi)}^{\pi} k^n(\varphi, \theta) \sin \theta \cdot F_n(\varphi, \theta) d\theta = \\
&= \left\{ \begin{array}{l} x = \varphi - \pi \\ \varphi = x + \pi \\ d\varphi = dx \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} y = \pi - \theta \\ \theta = \pi - y \\ d\theta = -dy \end{array} \right\} = \\
&= - \int_{-\pi}^{\pi} dx \int_{\pi - \mathcal{G}(x + \pi)}^0 k^n(x + \pi, \pi - y) \sin(\pi - y) \cdot F_n(x + \pi, \pi - y) dy = \\
&= \int_{-\pi}^{\pi} dx \int_0^{\mathcal{G}(x)} k^n(x, y) \sin y \cdot F_n(x, y) dy = \\
&= \int_{-\pi}^0 dx \int_0^{\mathcal{G}(x)} k^n(x, y) \sin y \cdot F_n(x, y) dy + \int_0^{\pi} dx \int_0^{\mathcal{G}(x)} k^n(x, y) \sin y \cdot F_n(x, y) dy =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left. \begin{cases} z = x + 2\pi \\ x = z - 2\pi \\ dx = dz \end{cases} \right\} = \int_{\pi}^{2\pi} dz \int_0^{\vartheta(z-2\pi)} k^n(z-2\pi, y) \sin y \cdot F_n(z-2\pi, y) dy + \\
&+ \int_0^{\pi} dx \int_0^{\vartheta(x)} k^n(x, y) \sin y \cdot F_n(x, y) dy = \int_{\pi}^{2\pi} dz \int_0^{\vartheta(z)} k^n(z, y) \sin y \cdot F_n(z, y) dy + \\
&+ \int_0^{\pi} dx \int_0^{\vartheta(x)} k^n(x, y) \sin y \cdot F_n(x, y) dy = \int_0^{\pi} dx \int_0^{\vartheta(x)} k^n(x, y) \sin y \cdot F_n(x, y) dy.
\end{aligned}$$

Таким образом, выражения для моментов $M_n(D_1)$ и $M_n(D_2)$ отличаются только обозначениями переменных интегрирования и, следовательно, одинаковы. Это значит, что плоскость Π является плоскостью n -симметрии тела D . Поскольку плоскость Π была проведена через начало координат произвольно, то начало координат выступает центром n -симметрии тела D , что и требовалось доказать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доказанная лемма распространяет достаточный критерий, установленный в статье [24] для 0-симметрии (то есть для s -симметрии), на общий случай n -симметрии. Принятое в настоящей работе требование неотрицательности функции $f(\rho, \varphi, \theta)$ является естественным, поскольку эта функция понимается как функция плотности тела D . Между тем, установленная лемма останется справедливой и без этого ограничения. Однако в этом случае придется иметь дело с телами отрицательной плотности или же (что менее удобно, но более правильно) использовать подход, принятый в работе [24]. В этой статье понятие пространственного тела не используется: рассматриваются центры симметрии функции трех переменных, определенной в выпуклой области пространства. Следует отметить, что разница между двумя подходами не принципиальна, и все результаты могут быть сформулированы как в рамках одной, так и в рамках другой терминологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

8. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение. 1989. 297 с.
9. Трент Е.М. Резание металлов. М.: Машиностроение. 1980. 263 с.
10. Участки для электроэрозионной обработки рабочих деталей вырубных штампов и пресс-форм: методические рекомендации по проектированию. М.: ОНТИ ЭНИМС. 1983. 47 с.
11. Этин А.О. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийным инструментом. М.: Машгиз. 1953. 173 с.
12. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании. М.: Машиностроение-1. 2004. 230 с.
13. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Минск: Новое знание. 2006. 512 с.
14. Шум Ал.А. О симметрии функций, определенных в круге // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2014. Вып. 25. С. 3–8.
15. Шум Ал.А. Замечание об s -симметричных функциях // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2015. Вып. 27. С. 3–6.
16. Шум Ал.А. О центрах симметрии функции двух переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. Вып. 30. С. 19–23.
17. Шум Ал.А. О центрах симметрии функции, определенной в выпуклой области плоскости // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. Вып. 31. С. 19–22.
18. Шум Ал.А. Симметрическая линия функции двух переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. Вып. 32. С. 103–105.
19. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Симметрическая линия правильного однородного треугольника // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. Вып. 34. С. 47–53.
20. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Параметрические уравнения симметрической линии правильного однородного треугольника // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. Вып. 34. С. 44–47.
21. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Замечание о симметрии функций, определенных в шаре // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 3 (3). С. 38–46.
22. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Об одном критерии s -симметрии функции трех переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4 (4). С. 30–35.
23. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О центрах симметрии функции трех переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 1 (5). С. 71–78.
24. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О центрах симметрии функции, определенной в выпуклой области пространства // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 57–65.
25. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Замечание о центрах s -симметрии и c -симметрии плоской пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 63–70.

26. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Моменты плоской пластины относительно прямой и некоторые вопросы симметрии // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 2 (10). С. 78–84.
27. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О центрах симметрии плоской выпуклой пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 3 (11). С. 65–72.
28. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О понятии n -симметрии пространственного тела // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 3 (15). С. 66–72.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

ВЕТОШКИН Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика, информатика и вычислительная техника», Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университета им. Н.Э. Баумана», 141005, Россия, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1. E-mail: vetkin@mgul.ac.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Шум Ал.А., Ветошкин А.М. О центрах симметрии выпуклого пространственного тела // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 2 (18). С. 64–72.

ON THE CENTERS OF SYMMETRY OF A CONVEX SPATIAL BODY

Al.A. Shum¹, A.M. Vetoshkin²

¹*Tver State Technical University (Tver)*

²*Mytishchi branch of Moscow State Technical University
named after N. Uh. Bauman (Mytishchi, Moscow region)*

Abstract. The concept of the center of n -symmetry of a spatial body introduced by the authors earlier is considered. It is indicated that special cases of this general concept are the center of s -symmetry (the center of 0-symmetry) and the center of c -symmetry (the center of 1-symmetry). The previously established criterion for the coincidence of the center of s -symmetry of a convex spatial body with the origin of coordinates is transferred to the general case of n -symmetry.

Keywords: symmetry, c -symmetry, s -symmetry, n -symmetry, center of symmetry, density function, convex body, mass, center of mass, electric bus.

REFERENCES

1. Artamonov B.A., Volkov Yu.S., Drozhzhhalova V.I., Sedykhin F.V., Smolentsev V.P., Yampolsky V.M. *Elektrofizicheskie i elektrohimicheskie metody obrabotki materialov: uchebnoye posobiye* [Electrophysical and electrochemical methods of processing materials: manual]: in 2 vol. Moscow: Vysshaja shkola. 1983. Vol. 1. 247 p. Vol. 2. 208 p.
2. Vereschaka A.S. *Rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta s iznosostojkimi pokrytiami* [The performance of the cutting tool with wear-resistant coatings]. Moscow: Mashinostroenie. 1993. 336 p.
3. Voronichev N.M., Tartakovskiy J.E., Genin V.B. *Avtomaticheskie linii iz agregatnyh stankov* [Automatic lines of modular machines]. Moscow: Mashinostroenie. 1979. 487 p.
4. Dalskiy A.M., Gavrilyuk V.S. *Mekhanicheskaya obrabotka materialov* [Mechanical treatment of materials: college textbook]. Moscow: Mechanical Engineering. 1981. 266 p.
5. Nemilov E.F. *Elektroerozionnaya obrabotka materialov* [Electroerosion treatment of materials]. L.: Mashinostroenie. 1983. 160 p.
6. Poduraev V.N. *Avtomaticheski reguliruemye i kombinirovannye processy rezaniya* [Automatically adjustable and combined cutting processes]. Moscow: Mashinostroenie. 1977. 303 p.
7. Silin S.S. *Metod podobiya pri rezanii materialov* [Method of similarity when cutting materials]. Moscow: Mashinostroenie. 1979. 152 p.
8. Starkov V.K. *Obrabotka rezaniem. Upravlenie stabil'nost'yu i kachestvom v avtomatizirovannom proizvodstve* [Cutting processing. Stability and quality management in automated production]. Moscow: Mashinostroenie. 1989. 297 p.
9. Trent E.M. *Rezanie metallov* [Metal cutting]. Moscow: Mashinostroenie. 1980. 263 p.
10. *Uchastki dlya elektroerozionnoj obrabotki rabochih detalej vyrubnyh shtampov i press-form: metodicheskkiye rekomendatsii po proyektirovaniyu* [Areas for electrical discharge machining of working parts of cutting dies and molds: design guidelines]. Moscow: ONTI ENIMS. 1983. 47 p.
11. Etin A.O. *Kinematicheskij analiz i vybor effektivnyh metodov obrabotki lezviynym instrumentom* [Kinematic analysis and selection of effective methods of processing with a climbing tool]. Moscow: Mashgiz. 1953. 173 p.
12. Yanushkin A.S., Shorkin V.S. *Kontaktnye processy pri elektroalmaznom shlifovanii* [Contact processes in electro-diamond grinding]. Moscow: Mashinostroenie-1. 2004. 230 p.
13. Yastcheritsyn P.I., Feldshtein E.E., Korniewicz M.A. *Teoriya rezaniya* [Theory of cutting]. Minsk: Novoe znanie. 2006. 512 p.
14. Shum A.I.A. On the symmetry of the functions defined in the circle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2014. Vol. 25, pp. 3–8. (In Russian).
15. Shum A.I.A. The comment about s -symmetric functions. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2015. Vol. 27, pp. 3–6. (In Russian).
16. Shum A.I.A. About the centers of symmetry of a function of two variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2016. Vol. 30, pp. 19–23. (In Russian).
17. Shum A.I.A. About the centers of symmetry of a function defined in a convex domain of the plane. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2017. Vol. 31, pp. 19–22. (In Russian).
18. Shum A.I.A. Symmetric line of a function of two variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2017. Vol. 32, pp. 103–105. (In Russian).
19. Shum A.I.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. The symmetric line of a regular homogeneous triangle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2018. Vol. 34, pp. 47–53. (In Russian).

20. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. Parametric equations of the symmetric line of a regular homogeneous triangle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2018. Vol. 34, pp. 44–47. (In Russian).
21. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. A note on the symmetry of functions defined in a ball. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Tehniceskije nauki»*. 2019. No. 3 (3), pp. 38–46. (In Russian).
22. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. On one criterion of s -symmetry of a function of three variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Tehniceskije nauki»*. 2019. No. 4 (4), pp. 30–35. (In Russian).
23. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. About the centers of symmetry of a function of three variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika I himicheskie tehnologii»*. 2020. No. 1 (5), pp. 71–78. (In Russian).
24. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. About the centers of symmetry of the function, defined in a convex area of space. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himicheskie tehnologii»*. 2020. No. 2 (6), pp. 57–65. (In Russian).
25. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. A note on the centers of s -symmetry and c -symmetry of a flat plate. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himicheskie tehnologii»*. 2021. No. 1 (9), pp. 63–70. (In Russian).
26. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. Moments of a flat plate relative to a straight line and some questions of symmetry. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himicheskie tehnologii»*. 2021. No. 2 (10), pp. 78–84. (In Russian).
27. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. On the centers of symmetry of a flat convex plate. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Series «Construction. Electrical engineering and chemical technologies»*. 2021. No. 3 (11), pp. 65–72. (In Russian).
28. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. On the concept of n -symmetry of a spatial body. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Series «Construction. Electrical engineering and chemical technologies»*. 2022. No. 3 (15), pp. 66–72. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. On the centers of symmetry of a convex spatial body // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2023. No. 2 (18), pp. 64–72.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 691.168

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДГЕЗИОННЫХ ДОБАВОК «АМДОР» ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ

*М.Е. Бокова¹, Д.В. Данилов², П.А. Дужий³, Д.Ю. Небратенко^{1,3}**¹Российский университет транспорта (г. Москва)**²Асфальтобетонный завод «Курьяново» (г. Москва)**³МИРЭА – Российский технологический университет (г. Москва)*

© Бокова М.Е., Данилов Д.В,
Дужий П.А., Небратенко Д.Ю., 2023

Аннотация. Указано, что одной из причин образования дефектов в верхних слоях дорожного покрытия может стать их недостаточная водо- и морозостойкость. Отмечено, что этот недостаток обусловлен плохой адгезией битумного вяжущего к каменным материалам и наиболее часто для решения данной проблемы используются адгезионные добавки, влияющие на микроуровне на поверхностное взаимодействие вяжущего с твердым субстратом. Рассмотрено влияние нескольких добавок торговой марки «АМДОР» на свойства битумных вяжущих. Сделан вывод, что полученные результаты отражают воздействие выбранных адгезионных добавок на физические свойства измененного вяжущего непосредственно после модификации, а также после процесса краткосрочного старения методом RTFOT.

Ключевые слова: адгезионные добавки, «АМДОР-9», «АМДОР-10», «АМДОР-20Т», полимерно-битумные вяжущие.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-2-73-84

ВВЕДЕНИЕ

Из-за роста уровня благосостояния населения и, следовательно, количества автомобилей в Российской Федерации в последние десятилетия остро встает вопрос о расширении сети автомобильных дорог [1]. Удовлетворенность населения транспортной доступностью регионов, несмотря на значительное расширение федеральной и региональной дорожных сетей, еще не достигла желаемого уровня [2].

Одна из причин указанного противоречия кроется в неудовлетворительных сроках починки верхних слоев автомобильных дорог между основными ремонтами. Текущая починка оказывается неэффективной том числе из-за плохих клеящих свойств традиционных (ординарных) дорожных битумов. Отмеченное обстоятельство, с одной стороны, обусловлено постоянным увеличением степени переработки нефтяного сырья (глубины переработки сырой нефти) с целью повышения выхода так называемых светлых углеводородов, используемых в качестве моторных топлив. С другой стороны, отсутствие крупнотоннажных битумных терминалов с регулируемыми условиями хранения вяжущих

в регионах потребления битумов, отдаленных от нефтеперерабатывающих заводов, вызывает необходимость в применении высоких температур налива при отгрузке и перевозке вязущих, что также негативно влияет на их качество. В результате при производстве асфальтобетонных смесей ухудшается не только прочность склеивания битума со щебнем в начальный момент, но и снижается долговременная стабильность такого крепления, что существенно уменьшает проходимость автодорог и увеличивает затраты на ремонт и поддержание дорог в работоспособном состоянии [3, 4].

Практически все смесевые композиции, задействуемые в производстве строительных материалов, представляют собой структурированные дисперсные системы, которые относятся к классу упруговязкопластичных материалов. Знание реологических и иных характеристик исходных сырьевых смесей и возможность их варьирования в ходе переработки имеют большое значение, так как оптимальные показатели этих характеристик необходимы для успешной работы целевого композиционного материала [5]. Отсюда вытекает, что до сих пор остается актуальным вопрос об улучшении сцепления битумов с поверхностью минеральных материалов путем введения поверхностно-активных и адгезионных добавок, регулирующих указанные показатели в зависимости от исходных свойств как используемого вязущего, так и применяемых каменных материалов. Основная задача – снизить поверхностное натяжение на границе раздела битумное вязущее – щебенистый материал и, как следствие, повысить адгезию битума к минеральному материалу как основной, так и кислой природы.

Цели данного исследования – изучение воздействия адгезионных добавок «АМДОР-9», «АМДОР-10» и «АМДОР-20Т» на свойства окисленного дорожного битума до и после краткосрочного старения по методу RTFOT и апробирование для подтверждения пригодности использования в асфальтобетонном производстве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В связи с изменившейся торгово-экономической ситуацией (введением с 2014 г. санкционных ограничений США и европейскими странами по отношению к РФ) огромное внимание в дорожной отрасли стало уделяться применению именно отечественных материалов, в том числе применяемых и для регулирования свойств битумов. При этом в нашей стране давно существуют химические продукты, выпускаемые с большой грузоподъемностью и пользующиеся спросом на дорожно-строительном рынке в течение значительного ряда лет. К таким товарным продуктам можно отнести адгезионные добавки марки «АМДОР».

Адгезионная добавка «АМДОР-9» – катионное поверхностно-активное вещество, обеспечивающее высокую степень сцепления дорожных битумов с различными по природе минеральными материалами, в том числе с гранитным щебнем и песком, обладающим повышенными кислотными свойствами. Эта однородная вязкая жидкость получается на основе известных химических реагентов, таких как полиаминоамиды и имидазолины. «АМДОР-9» практически нерастворим в воде, но растворим в ароматических углеводородах, керосине и ограниченно растворим в спиртах. Важным технологическим показателем также является его способность не расслаиваться при транспортировке и хранении. При введении «АМДОР-9» начальная температура битума не должна превышать 150 °С [6].

Присадка «АМДОР-10» – усовершенствованная версия «АМДОР-9»: ее отличает от предыдущей добавки меньшая вязкость и более низкая температура потери текучести (для

«АМДОР-10» такой температурой является $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как для «АМДОР-9» – $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Следовательно в случае использования «АМДОР-10», можно уменьшить температуру приготовления и укладки горячих асфальтобетонных смесей на $10\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7].

Важно отметить, что «АМДОР-10» характеризуется также улучшенными органолептическими свойствами. Эта добавка сохраняет их во время введения в битум при температуре до $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также увеличении до 72 ч времени сохранения активности добавки в ходе прогрева при указанной температуре [7]. Это объясняется модификацией состава «АМДОР-10», а также его большей технологичностью в сравнении с «АМДОР-9». Указанные обстоятельства приводят к тому, что увеличивается срок годности битумного вяжущего с ранее введенной добавкой, что в итоге положительно сказывается на качественных показателях асфальтобетонных смесей (табл. 1).

Таблица 1

Технические требования к адгезионным добавкам [2, 4, 5, 7]

Показатель	Марка адгезионной добавки		
	«АМДОР-9»	«АМДОР-10»	«АМДОР-20Т»
Внешний вид	Вязкая жидкость (цвет – от светло-желтого до темно-коричневого)		
Плотность при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, г/см ³	0,93–0,99	0,93–0,99	1,25–1,3
Температура потери текучести, $^{\circ}\text{C}$	+15	–2	–5
Кислотное число, мг, не более	15	15	–
Массовая доля воды, %, не более	2	2	–
Максимальная температура битума при введении добавки, $^{\circ}\text{C}$	150	160	190
Сцепление с минеральным материалом битума, содержащего от 0,15 до 0,5 % добавки*	Не хуже контрольного образца № 2 по ГОСТ 11508. Не менее 4 баллов по ГОСТ 12801, п. 28	Не хуже контрольного образца № 2 по ГОСТ 11508. Не менее 4 баллов по ГОСТ 12801, п. 28	Не хуже контрольного образца № 2 по ГОСТ 11508 (до 0,4 % добавки). Не менее 4-х баллов по ГОСТ 12801, п. 28 (до 0,4 % добавки)

Примечание. * – количество добавки определяется природой минерального материала, качеством битума и составом асфальтобетонной смеси.

Адгезионная добавка «АМДОР-20Т» существенно отличается от «АМДОР-9» и «АМДОР-10». Она обеспечивает адгезию с каменными материалами не только кислого, но и основного характера. Это объясняется составом присадки: продукт базируется на органических эфирах фосфорной кислоты [8].

Дозировка адгезионной присадки «АМДОР-20Т» составляет от 0,1 до 0,4 % в зависимости от типа щебня и качества битума, тем самым обеспечивается степень покрытия поверхности щебня 90–100 %. Отметим, что «АМДОР-20Т» сохраняет текучесть до $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для достижения максимального эффекта от введения данной добавки, по данным изготовителя, необходимо интенсивное перемешивание с битумом в течение не менее 5 ч при температуре 140–180 $^{\circ}\text{C}$.

Проведенными ранее исследованиями установлено [9], что «АМДОР-20Т» не является поверхностно-активным веществом аминного типа. На спектре (рис. 1) видны фосфорорганические соединения (валентные колебания Р=О-групп 1242 см^{-1}), а также водородные связи (комбинированная частота: валентные колебания катионов аммония (водородная связь) + связанная ОН-группа 3230 см^{-1}). Отсутствие ярко выраженных пиков, соответствующих аминным и карбоксильным группам, позволяет заключить, что это поверхностно-активное вещество является неионогенным [9–11].

Присадка способствует равномерному диспергированию агломератов асфальтенов в объеме вяжущего, что замедляет старение битума [10], не имеет неприятного, аминного запаха и стабильна при высоких температурах.

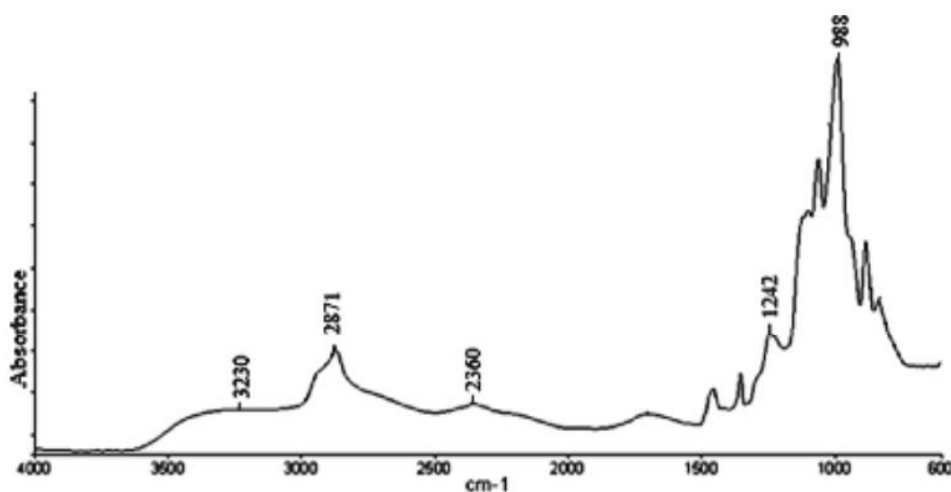


Рис. 1. ИК-спектр адгезионной добавки «АМДОР-20Т»

Недостатком некоторых типов добавок выступает потеря ими функциональных свойств при высоких температурах в процессе подготовки битума и получения асфальтобетонной смеси. В связи с этим ранее были проведены работы по оценке термостабильности ряда добавок [12, 13]. Для моделирования технологических условий проводилось стандартное испытание: выдерживание битума в тонком слое при температуре 163 $^{\circ}\text{C}$ в течение 5 ч. Согласно полученным данным, адгезионная добавка «АМДОР-20Т» сохраняла свойства в течение 15 сут. По токсикологическим свойствам адгезионная присадка «АМДОР-20Т» относится к умеренно токсичным веществам 3-го класса опасности (см. ГОСТ 12.1.007-76), является водорастворимым, био-разлагаемым соединением.

В качестве битумного вяжущего при проведении исследований был использован битум нефтяной дорожный вязкий БНД 70/100, произведенный на Рязанском нефтеперерабатывающем заводе (табл. 2).

Таблица 2

Физико-механические показатели примененного вяжущего

№ п/п	Наименование показателя	БНД 70/100	ГОСТ (методы испытаний)
1	Глубина проникания иглы, 0,1 мм, не менее, при 25 °С	71	11501
2	Глубина проникания иглы, 0,1 мм, не менее, при 0 °С	34	11501
3	Растяжимость, см, не менее, при 25 °С	92	11505
4	Растяжимость, см, не менее, при 0 °С	3,9	11505
5	Температура размягчения по кольцу и шару, °С, не ниже	48	11506
6	Температура хрупкости, °С	-17	11507
7	Температура вспышки, °С	266	4333
9	Изменение температуры размягчения после прогрева, °С, не более	4,6	18180, 11506

Процедура ввода в битум нефтяной дорожный адгезионных добавок в жидком виде не представляет особых сложностей. Она проводилась в течение 20–25 мин при температуре 140–150 °С. В качестве смесителя был взят лабораторный диспергатор IKA Ultra-Turrah T25 digital [14] с частотой вращения ротора не выше 600 об/мин (рис. 2).



Рис.2. Распределение компонентов в битумной смеси с помощью смесителя IKA Ultra-Turrah T25 digital

Изменение показателей вяжущих, полученных после введения трех марок адгезионных добавок, фиксировали традиционными методами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных испытаний были получены зависимости изменения физико-механических свойств битумных вяжущих от типа адгезионной добавки, использованной в качестве модификатора (табл. 3).

Таблица 3

Физико-механические показатели битума,
модифицированного адгезионными добавками марки «АМДОР»

№ п/п	Наименование показателя	«АМДОР-9»	«АМДОР-10»	«АМДОР-20Т»
1	Глубина проникания иглы, 0,1 мм, при 25 °С	73	73	75
2	Глубина проникания иглы, 0,1 мм, при 25 °С после применения метода RTFOT	70	68	73
3	Глубина проникания иглы, 0,1 мм, при 0 °С	35	34	33
4	Глубина проникания иглы, 0,1 мм, при 0 °С после применения метода RTFOT	25	23	26
5	Температура размягчения по кольцу и шару, °С	48	48	49
6	Температура размягчения по кольцу и шару, °С, после применения метода RTFOT	51	51	50
7	Температура хрупкости, °С	-21,5	-22	-22,5
9	Температура хрупкости, °С, после применения метода RTFOT	-16,5	-17,5	-21,5
10	Изменение массы битума после применения метода RTFOT, %	0,130	0,155	0,115

Из представленных в табл. 3 данных видно, что в случае применения в составе битума «АМДОР-9» и «АМДОР-10» заметного варьирования значений у подавляющего большинства традиционных показателей не наблюдается, то есть фактические значения находятся в пределах ошибки, установленных для выбранного метода испытаний. Так, изменение глубины проникания иглы при 25 °С после краткосрочного старения, проведенного по методике RTFOT [15], при применении «АМДОР-9» составляет 3 мм, «АМДОР-10» – 5 мм. При 0 °С указанная разница равна 10 и 11 °С соответственно. Изменение температуры хрупкости после RTFOT-старения вяжущего также остаются в установленных пределах: 4,5 °С («АМДОР-9») и 5 °С («АМДОР-10»). Варьирование показателей в случае использования адгезионной добавки «АМДОР-20Т» несколько ниже. Изменение глубины проникания иглы после RTFOT-старения в случае с указанной добавкой составляет 2 °С (при 25 °С) и 7 °С (при 0 °С), а температуры хрупкости – всего 1 °С. При этом наблюдается некоторый рост абсолютных значений температуры

хрупкости вяжущего в ряду «АМДОР-9»/«АМДОР-10»/«АМДОР-20Т», а температура размягчения по кольцу и шару остается практически постоянной. В целом введение адгезионной добавки любой марки в рекомендованном производителем количестве (от 0,15 до 0,5 % для добавок «АМДОР-9» и «АМДОР-10» и от 0,15 до 0,4 % для добавки «АМДОР-20Т») не оказывает кардинального влияния на реологические и физико-механические показатели битумного вяжущего.

Отметим, что испытания асфальтобетонных смесей на реальных минеральных компонентах являются действительно объективным способом, определяющим необходимость использования той или иной адгезионной добавки. В данном случае рекомендуется изучить прочностные свойства смеси, ее водонасыщение, коэффициент длительной водостойкости, морозостойкость и т. д. [13].

Для оценки влияния адгезионных добавок на физико-механические свойства асфальтобетонных смесей нами был выбран мелкозернистый плотный асфальтобетон типа А, номер марки I (см. ГОСТ 9128-2013). Асфальтобетон для 2-й дорожно-климатической зоны был изготовлен на основе щебня гранитного фракции 10–15 мм в количестве 19,7 % и фракции 4–8 мм в количестве 32,7 % (производитель – акционерное общество «ЛСР. Базовые материалы»), песка из отсева дробления фракции 0–5 мм в количестве 36,1 %, минерального порошка в количестве 6,6 % (производитель – ООО «ГК ТЕРЕКС») и битума БНД 70/100 в количестве 5,3 % (производитель – ООО «Газпром-нефть – Битумные материалы»). Концентрации адгезионных добавок в асфальтобетоне не превышали 0,5 %. Результаты лабораторного определения показателей представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты определения физико-механических показателей асфальтобетона мелкозернистого плотного типа А (марка I)

№ п/п	Наименование показателя	Без добавок	«АМДОР-9»	«АМДОР-10»	«АМДОР-20Т»	Требования ГОСТа
1	2	3	4	5	6	7
1	Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре 50 °С	1,0	1,2	1,2	1,3	Не менее 1,0
2	Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре 20 °С	3,2	3,2	3,3	3,4	Не менее 2,5
3	Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре 0 °С	8,5	8,6	8,7	8,8	Не более 11,0
4	Водостойкость	0,88	0,90	0,90	0,92	Не менее 0,90

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6	7
5	Водостойкость при длительном водонасыщении	0,81	0,82	0,88	0,89	Не менее 0,85
6	Сдвигоустойчивость при 50°C по коэффициенту внутреннего трения, МПа	0,90	0,89	0,90	0,91	Не менее 0,87
7	Сцепление при сдвиге, МПа	0,26	0,28	0,28	0,30	Не менее 0,25
8	Трещиностойкость по пределу прочности на растяжение при расколе при температуре 0 °С и скорости деформирования 50 мм/мин, МПа	4,5	4,9	4,9	5,2	Не менее 3,5; не более 6,0
9	Пористость минеральной части, %	15,40	15,87	15,78	15,50	От 14 до 19,0
10	Остаточная пористость, %	2,67	3,02	2,98	2,71	От 2,5 до 5,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были проанализированы результаты модификации битума нефтяного дорожного вязкого БНД 70/100 адгезионными добавками марки «АМДОР»; определены физико-механические показатели битумных вяжущих, полученных в ходе последовательного смешения битума нефтяного дорожного и трех марок добавок: «АМДОР-9», «АМДОР-10» и «АМДОР-20Т».

Наилучшие результаты для асфальтобетонной смеси типа А, марки I были достигнуты при использовании адгезионной добавки «АМДОР-20Т». Это проявилось в увеличении водостойкости асфальтобетона (на 4,6 %), водостойкости при длительном водонасыщении (на 9,8 %) и предела прочности при сжатии при температуре 50 °С (на 30 %) в сравнении с асфальтобетоном на вяжущем без добавки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность научно-исследовательской части кафедры «Химия» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» за помощь в проведении ИК-спектроскопии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чистяков И.В. Разработка научных и технологических основ гидрологического обоснования проектных решений автомобильных дорог. Дисс. ... д-ра техн. наук. М. 2014. 242 с.
2. Донченко В.В., Баранов А.С., Немчинов Д.М., Поляков А.С. Городское планирование и транспортное поведение в Российской Федерации / под общ. ред. В.В. Донченко. М.: КнигИздат. 2022. 240 с.
3. Отраслевой дорожный методический документ. Руководство по применению поверхностно-активных веществ при устройстве асфальтобетонных покрытий (взамен ВСН 59-68): Распоряжение М-ва Рос. Федерации от 18.04.2003 № ОС-358-р [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200032167> (дата обращения: 26.07.2023).
4. Столяренко В.И., Ольшанский В.И. Физические методы модификации структуры и свойств полимерных композиционных материалов на основе стеклоткани // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 2 (14). С. 74–85. DOI: 10.46573/2658-7459-2022-2-74-85.
5. Белов В.В. Регулирование реологических свойств трехфазных дисперсных систем, применяемых для производства строительных материалов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 3 (11). С. 73–78. DOI: 10.46573/2658-7459-2021-73-78.
6. Добавка адгезионная дорожная «АМДОР-9» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://amdor.ru/produkcija/adgezionnye-dobavki/dobavka-adgezionnaya-dorozhnaya-amdor-9/> (дата обращения: 27.07.2023).
7. Добавка адгезионная дорожная «АМДОР-10» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://amdor.ru/produkcija/adgezionnye-dobavki/dobavka-adgezionnaya-dorozhnaya-amdor-10/> (дата обращения: 28.07.2023).
8. Добавка адгезионная дорожная «АМДОР-20Т» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://amdor.ru/produkcija/adgezionnye-dobavki/dobavka-adgezionnaya-dorozhnaya-amdor-20t/> (дата обращения: 28.07.2023).
9. Аюпов Д.А., Потапова Л.И., Казакулов Р.И., Хакимуллин Ю.Н. Исследование составов дорожных поверхностно-активных веществ // *Известия КГАСУ*. 2018. № 3 (45). С. 178–188.
10. Методические рекомендации по применению адгезионных присадок «АМДОР». СПб. 2012. 8 с. URL: <http://амдор-юг.рф/2016/06/07/методические-рекомендации-по-примен/> (дата обращения: 28.07.2023).
11. Cesare O., Teltayev B., Angelico R. Adhesion promoters in bituminous road materials: a review // *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. № 5. Pp. 524–534.
12. Соломенцев А.Б., Мосюра Л.С., Анахин Н.Ю., Грошев Н.Г. Исследование физико-механических свойств асфальтовяжущего с адгезионными добавками // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017. № 1–4 (55). С. 124–127.
13. Дементьев Н.В., Сандлер Э.А., Черемисинов С.Д. Круглый стол: Адгезионные добавки // *Мир Дорог*. 2019. № 117. С. 50–52.
14. ИКА Диспергаторы. Т 25 digital ULTRA-TURRAX [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ika.com/ru/Products-LabEq/Dispersers-pg177/T-25-digital-ULTRA-TURRAX-3725000/> (дата обращения: 11.05.2023).

15. ГОСТ 33140-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения старения под воздействием высокой температуры и воздуха (метод RTFOT). М.: Стандартинформ. 2015. 10 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БОКОВА Мария Евгеньевна – бакалавр кафедры «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты», Институт пути, строительства и сооружений ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9.

ДАНИЛОВ Дмитрий Вячеславович – начальник лаборатории ПК асфальтобетонного завода «Курьяново», ГБУ «Автомобильные дороги», 123154, Россия, Москва, ул. Народного Ополчения, д. 31.

ДУЖИЙ Павел Александрович – студент бакалавриата кафедры «Химия и технология переработки эластомеров им. Ф.Ф. Кошелева», Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», 119454, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

НЕБРАТЕНКО Дмитрий Юрьевич – кандидат химических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9; доцент кафедры «Химия и технология переработки эластомеров им. Ф.Ф. Кошелева», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», 119454, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78. E-mail: nebratenko@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Бокова М.Е., Данилов Д.В, Дужий П.А., Небратенко Д.Ю. Особенности использования адгезионных добавок для модификации битумных вяжущих // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 2 (18). С. 73–84.

FEATURES OF THE USE OF ADHESIVE ADDITIVES «AMDOR» FOR THE MODIFICATION OF BITUMEN BINDERS

M.E. Bokova¹, D.V. Danilov², P.A. Duzhiy³, D.Yu. Nebratenko^{1,3}

¹*Russian University of Transport (Moscow)*

²*Asphalt Concrete Plant «Kuryanovo» (Moscow)*

³*MIREA – Russian Technological University (Moscow)*

Abstract. It is indicated that one of the reasons for the formation of defects in the upper layers of the pavement may be their insufficient water and frost resistance. It is noted that this disadvantage is due to the poor adhesion of the bitumen binder to stone materials and most often adhesive additives are used to solve this problem, affecting the surface interaction of the binder with a solid substrate at the micro level. The influence of several additives of the AMDOR trademark on the properties of bitumen binders is considered. It is concluded that the results obtained reflect the effect of the selected adhesive additives on the physical properties of the modified binder immediately after modification, as well as after the short-term aging process by RTFOT.

Keywords: adhesive additives, «AMDOR-9», «AMDOR-10», «AMDOR-20T», polymer-bitumen binders.

REFERENCES

1. Chistyakov I.V. Development of scientific and technological bases of hydrological substantiation of design solutions of highways. Diss... d-ra technical sciences. Moscow. 2014. 242 p. (In Russian).
2. Donchenko V.V., Baranov A.S., Nemchinov D.M., Polyakov A.S. Gorodskoe planirovanie i transportnoe povedenie v Rossijskoj Federacii [Urban planning and transport behavior in the Russian Federation] / under the gen. ed. V.V. Donchenko. M.: KnigIzdat. 2022. 240 p.
3. Otrasevyy dorognyy metodicheskii dokument. Rukovodstvo po primeneniyu poverhnostno-aktivnykh veschestv pri ustroistve asfaltobetonnykh pokrytiy (vzamen VSN 59-69): Rasporjajeniye M-va Ros. Federazii ot 18.04.2003 No OC-358-p [Industry road methodological document. Guidelines for the use of surfactants in the construction of asphalt concrete coatings (instead of VSN 59-68): Order of M-ry of Transport of the Rus. Federation No. OC-358-p [Electronic resource]. – Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200032167> (date of access: 26.07.2023). (In Russian).
4. Stolyarenko V.I., Olshansky V.I. Physical methods of modification of the structure and properties of polymer composite materials based on fiberglass. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2022. No. 2 (14), pp. 74–85. DOI: 10.46573/2658-7459-2022-2-74-85 (In Russian).
5. Belov V.V. Regulation of rheological properties of three-phase dispersed systems used for the production of building materials. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2021. No. 3 (11), pp. 73–78. DOI: 10.46573/2658-7459-2021-73-78. (In Russian).
6. Adhesive road additive «AMDOR-9» [Electronic resource]. – Access mode: <https://amdor.ru/produkcija/adgezionnye-dobavki/dobavka-adgezionnaya-dorozhnaya-amdor-9/> (date of access: 27.07.2023). (In Russian).
7. Adhesive road additive «AMDOR-10» [Electronic resource]. – Access mode: <https://amdor.ru/produkcija/adgezionnye-dobavki/dobavka-adgezionnaya-dorozhnaya-amdor-10/> (date of access: 28.07.2023). (In Russian).
8. Adhesive road additive «AMDOR-20T» [Electronic resource]. – Access mode: <https://amdor.ru/produkcija/adgezionnye-dobavki/dobavka-adgezionnaya-dorozhnaya-amdor-20t/> (date of access: 28.07.2023). (In Russian).
9. Ayupov D.A., Potapova L.I., Kazakkulov R.I., Khakimullin Yu.N. Investigation of compositions of road surfactants. *Izvestiya KGASU*. 2018. No. 3 (45), pp. 178–188. (In Russian).
10. Metodicheskie rekomendazii po primeneniju adgesionnykh prisadok «AMDOR» [Methodological recommendations for the use of adhesive additives «AMDOR»]. St.-Petersburg. 2012. 8 p. URL: <http://амдор-юг.рф/2016/06/07/методические-рекомендации-по-примен/> (date of access: 28.07.2023).
11. Cesare O., Teltayev B., Angelico R. Adhesion promoters in bituminous road materials: a review. *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. No. 5, pp. 524–534.

12. Solomentsev A.B., Misyura L.S., Anokhin N.Yu., Groshev N.G. Investigation of physical and mechanical properties of asphalt binder with adhesive additives. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2017. No. 1–4 (55), pp. 124–127. (In Russian).
13. Dementiev H.V., Sandler E.A., Cheremisinov S.D. Round table: Adhesive additives. *Mir Dorog*. 2019. No. 117, pp. 50–52. (In Russian).
14. IKA Dispersants. T 25 digital ULTRA-TURRAX. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.ika.com/ru/Products-LabEq/Dispersers-pg177/T-25-digital-ULTRA-TURRAX-3725000/> (date of access: 11.05.2023). (In Russian).
15. GOST 33140-2014. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Bitумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения старения под воздействием высокой температуры и воздуха (метод RTFOT) [STAST 33140-2014. Public roads. Bitumen oil road viscous. Method for determining aging under the influence of high temperature and air (method RTFOT)]. Moscow: Standartinform. 2015. 10 p. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BOKOVA Maria Evgenievna – Bachelor of the Department of Highways, Airfields, Foundations and Foundations, Institute of Roads, Construction and Structures of Russian University of Transport, 9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russia.

DANILOV Dmitry Vyacheslavovich – Head of the Laboratory of the Asphalt Concrete Plant «Kuryanovo», SBI «Highways», Narodnaya opolcheniya str., 31, Moscow, 123154, Russia.

DUZHIY Pavel Alexandrovich – Bachelor's Student of the Department of Chemistry and Technology of Processing Elastomers named after F.F. Koshelev, Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies of MIREA – Russian Technological University, 78, Vernadsky ave., Moscow, 119454, Russia.

NEBRATENKO Dmitry Yuryevich – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Highways, Airfields, Foundations and Foundations of the Russian University of Transport, 9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russia; Associate Professor of the Department Chemistry and Technology of Elastomer Processing named after F.F. Koshelev, MIREA – Russian Technological University, 78, Vernadsky ave., Moscow, 119454, Russia. E-mail: nebratenko@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Bokova M.E., Danilov D.V., Duzhiy P.A., Nebratenko D.Yu. Features of the use of adhesive additives for the modification of bitumen binders // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 2 (18). pp. 73–84.

УДК 699.82

**ИНЪЕКЦИОННЫЕ ПОЛИУРЕТАНОВЫЕ СОСТАВЫ
ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ГИДРОИЗОЛЯЦИИ:
ПОДБОР МАТЕРИАЛОВ-АНАЛОГОВ
В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ***С.А. Кульков, А.В. Савич**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Кульков С.А., Савич А.В., 2023

Аннотация. Статья посвящена полиуретановым инъекционным составам, применяемым при устройстве гидроизоляции подземных сооружений. На основании практического опыта подрядных организаций даны предложения по составлению таблицы материалов-аналогов для обеспечения их взаимозаменяемости в проектных решениях.

Ключевые слова: инъекционные составы, смолоинъекция, инъектирование, инъекционная гидроизоляция, полиуретановые составы, гидроизоляция, полиуретановые смолы, гидроактивные смолы, импортозамещение.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-2-85-96

Технологии инъекции полиуретановых смол в последние десятилетия активно применяются при устройстве и восстановлении гидроизоляции подземных сооружений как в России, так и за рубежом. У специалистов-шахтостроителей на слуху названия таких известных европейских производителей инъекционных составов для промышленной гидроизоляции, как BASF (Германия), Drizoro (Испания), Sika (Швейцария), De Neef (Бельгия). В России технологии и материалы этих компаний успешно применялись при возведении многих подземных сооружений, например железнодорожных тоннелей дороги Адлер – Красная поляна к зимней Олимпиаде 2014 г.: «Для гидроизоляции уже построенных тоннелей применялись ... технологии пост-инъектирования с помощью одно- и двухкомпонентных материалов концерна BASF» [1, с. 114]. Однако не стоит забывать, что отечественные технологии инъектирования полиуретановых смол имеют не менее богатую историю развития и могут успешно конкурировать с импортными аналогами.

В начале 1980-х гг. прошлого века сотрудниками Кольского научного центра Академии наук СССР велись активные научные изыскания в области применения смолоинъекционных технологий для химического упрочнения скальных горных пород [2]. Разработанные технологии использовались для закрепления этих пород и обеспечения гидроизоляции подземных сооружений. В 1998 г. были проведены экспериментальные исследования деформационно-прочностных свойств отечественных полиуретановых композиций производства ООО «Тимп» (г. Владимир), применяемых для гидроизоляции тоннелей метрополитенов [3]. С тех пор и по настоящее время завод в г. Владимире производит специализированные полиуретановые смолы инъекционных составов для нужд подземного строительства, совершенствуя рецептуру с учетом опыта практического использования разработанных составов.

Пример другого производственного предприятия, унаследовавшего традиции советской науки, – это ООО «Спецгидроизоляция “Монолит”» (г. Санкт-Петербург),

основанное специалистами, непосредственно участвовавшими в свое время в разработке «технологии инъекционной гидроизоляции с применением отечественных одно- и двухкомпонентных полиуретановых составов» [4, с. 146]. В 1997 г. ООО «Спецгидроизоляция “Монолит”» совместно с АО «Метрострой» была разработана Инструкция по гидроизоляции подземных сооружений на объектах метрополитена методом смолоинъекции (см. ТУ 2226-007-39484066-97).

ООО «Спецгидроизоляция “Монолит”» занимается, в частности, крупными подземными объектами и применяет при этом российские инъекционные составы. Например, это общество осуществляло капитальный ремонт наклонных ходов станций «Маяковская» и «Академическая» Санкт-Петербургского метрополитена. Задачи гидроизоляции тоннельной обделки данных станций были решены с помощью отечественных инъекционных составов. На обеих станциях технология восстановления водонепроницаемости сборной тоннельной крепи из чугунных тубингов (указанная технология разработана ООО СК «Подземстройреконструкция» по заказу ГУП «Петербургский метрополитен») предусматривала нагнетание отечественных полиуретановых составов марки «Изолит» за пределы обделки (через пробки в спинках тубингов) и в швы стыков чугунных тубингов. Для нагнетания использовали два вида составов: гидроактивную однокомпонентную и двухкомпонентную полиуретановую смолу.

Процесс полимеризации гидроактивной смолы сопровождается увеличением в объеме с образованием закрытопористой структуры. Это свойство гидроактивных полиуретановых смол позволяет обеспечивать надежную герметизацию фильтрационных каналов за счет вытеснения из них воды и создания химически преднапряженного заполнения. Кроме того, запуск реакции при контакте с водой дает возможность использовать однокомпонентную схему нагнетания без риска отверждения материала в шлангах и бункере насоса, что позволяет избежать дополнительных технологических операций по подготовке материалов к работе и промывке оборудования, а это существенно увеличивает скорость работ. В то же время при избыточном количестве воды, вовлеченной в реакцию, либо при пенообразовании в незамкнутом объеме (например, в плохо прочеканном шве) есть риск обратной усадки гидроактивного состава.

К преимуществам непенящихся двухкомпонентных полиуретановых составов, запускающих реакцию при смешивании компонентов без вовлечения в нее воды, можно отнести отсутствие усадки после полимеризации. По этой причине для надежности выполненной инъекционной гидроизоляции наклонных ходов станций «Академическая» и «Маяковская» Санкт-Петербургского метрополитена в проектных решениях [5, 6] было предусмотрено уплотнительное нагнетание двухкомпонентным полиуретановым составом «Изолит 2УК». В то же время самостоятельное использование таких составов при ликвидации течей имеет ограничение: не обладающий эффектом расширения состав, не теряющий подвижность при контакте с водой, зачастую вымывается напорными течами до начала отверждения. Особенно этот риск велик в случае использования материалов низкой вязкости. При установлении же короткого времени реакции за счет введения в систему катализаторов (менее 30 мин) возникает необходимость перехода на двухкомпонентную схему нагнетания, что усложняет технологический процесс. Кроме того, преждевременное схватывание материалов не обеспечивает глубокого заполнения фильтрационных каналов. Перечисленные особенности приводят к тому, что результаты работ при самостоятельном использовании двухкомпонентных составов сильно зависят от правильного выбора режима нагнетания, качества предварительной чеканки дефектов, скорости реакции

выбранного состава и его вязкости (отметим, что параметры течей могут значительно отличаться даже в пределах одной захватки!).

Существующие сложности выбора оптимальных материалов и их комбинаций заставляют проектировщиков перебирать варианты, предлагаемые различными поставщиками. Однако материалы различных производителей (независимо от страны происхождения) изготавливаются из одних и тех же исходных компонентов: изоцианатов, гидроксилсодержащих соединений – полиолов, а также специальных добавок, катализаторов, пеностабилизаторов и т. д., позволяющих в широких пределах варьировать свойства материала. Ориентируясь на во многом совпадающие запросы различных строительных производств, на выходе производители получают схожие материалы. При этом, как показывает практика, эффективные отечественные аналоги возможно подобрать для всех наиболее популярных в строительстве инъекционных полиуретановых составов.

Актуальность создания таблицы материалов-аналогов также связана с тем, что от завершения разработки проекта до начала работ по нему обычно проходит от одного до нескольких лет. За этот срок изменяется рыночная стоимость материалов, появляются новые составы, а ранее широко использовавшиеся могут стать недоступны. Особенно эта проблема стала актуальна для Российской Федерации в связи с введением международных санкций на поставки импортных материалов и компонентов для их производства. Отечественные проектировщики столкнулись с задачей оперативного пересогласования предусмотренных проектом материалов, а именно замены материалов, ранее поставляемых из-за рубежа, на доступные аналоги. Каталоги импортозамещения часто строятся в виде простого перечисления материалов и их кратких характеристик без указания групп аналогов, внутри которых обеспечивается технологическая взаимозаменяемость [5]. Проектировщикам приходится самостоятельно анализировать предлагаемые варианты, сравнивать их физические характеристики и технологические особенности. На объективность выбора часто влияет тот факт, что информация запрашивается у поставщиков материалов, а не у подрядных организаций, имеющих реальный практический опыт при работе с рассматриваемыми составами.

Поставщики специализированных составов порой акцентируют внимание проектных институтов на отличительных свойствах своих материалов вне контекста их применения. Так, часто относимая к плюсам материала низкая вязкость далеко не во всех случаях является положительной характеристикой. Кроме увеличения проникающей способности, снижение вязкости также приводит к росту технологических потерь материала через смежные участки или (при наличии интенсивной фильтрации) может служить причиной размывания нагнетаемого состава. При выборе составов следует учитывать и статистику брака, связанную со сложностью технологии их применения. Дело в том, что низковязкие двухкомпонентные составы с коротким временем реакции, используемые для остановки водопритоков, зачастую могут быть успешно заменены более вязкими составами, нагнетаемыми по одноразовой схеме. Правильность смешивания компонентов в такой схеме не зависит от исправности оборудования, поскольку либо осуществляется заранее, либо (в случае применения гидроактивных систем) вообще не требуется. При отказе однокомпонентного насоса нагнетание просто прекращается. В двухразовой схеме, применяемой при работе с акрилатными и двухкомпонентными полиуретановыми составами с коротким временем начала реакции, задействуется более сложное оборудование. При выходе из строя одного из двух совместно работающих насосов, пережатии шлага, засорении одного из обратных клапанов системы или их некорректном срабатывании возможно нарушение пропорции смешивания компонентов,

что неизбежно приводит к возникновению брака. Мгновенно отследить начало подобного сбоя в стесненных условиях подземного объекта обычно затруднительно.

Таким образом, при выборе инъекционных составов, помимо сравнения их физико-химических показателей, прежде всего следует реализовывать учет условий их использования, определять степень соответствия их свойств параметрам решаемых технических задач. В зависимости от наличия или интенсивности водопритока, ширины раскрытия инъектируемых дефектов к составам должны предъявляться различные требования по вязкости, пенообразованию, растворимости в воде, времени начала реакции. Сходные по характеристикам и технологическим особенностям материалы возможно объединить в отдельные группы, описав для каждой из них область применения. Внутри каждой группы при этом будет обеспечиваться взаимозаменяемость материалов без необходимости корректировки технических решений. Следуя этому принципу, наиболее часто применяемые инъекционные полиуретановые составы можно разделить на несколько групп (незначительными различиями в вязкости, скорости реакции, коэффициенте расширения внутри групп можно пренебречь):

1. Однокомпонентные гидроактивные полиуретановые составы.

1.1. Однокомпонентные полиуретановые гели средней и высокой вязкости 600–1250 мПа·с. К этой группе можно отнести такие материалы, как «Тимпанат 101» (1 200 мПа·с), «Манопур С» (800 мПа·с), «Изолит ПУ» (1 250 мПа·с), «Apiflex – инъекция S» (600 мПа·с). Полиуретановые гели являются гидрофильными, то есть растворяются в воде и полностью физически и химически связывают ее в различных пропорциях. Полимеризация сопровождается увеличением в объеме, зависящем от количества вступившей в реакцию воды и температурных условий. При соотношении «одна часть материала к трем и менее частям воды» образуется эластичная пена, обладающая гидроизоляционными свойствами благодаря закрытопористой структуре. Образец состава, полимеризованный с образованием пены, представлен на рис. 1.



Рис. 1. Образец полимеризованного гидроактивного полиуретанового состава с закрытопористой структурой

При увеличении количества воды в пропорции (вплоть до 1:30) образуется высокоэластичный гель. Прочность геля (модуль эластичности) растет с повышением массовой доли полимера в геле. При образовании геля не происходит отделения воды, то есть вся вода, присутствующая в системе, связывается химически и физически. Преимущества: вязкость материалов и старт реакции при контакте с водой препятствуют вымыванию инъектируемой системы. Эластичность конечного продукта полимеризации позволяет использовать материалы для ликвидации водопроявлений в деформационных

швах и зонах повышенных динамических нагрузок. К ограничениям области применения следует отнести то, что при прекращении контакта с водой (например, в зоне переменного уровня грунтовых вод) наблюдается усадка состава. Степень усадки пропорциональна количеству воды, связанному материалом в ходе полимеризации. Кроме того, дальнейшее увеличение количества воды в растворе, несмотря на способность материала связывать воду вплоть до соотношений 1:30, приводит к потере реакционной способности. Поэтому при ликвидации высоконапорных течей из-за риска перемешивания состава с избыточным количеством воды (например, при инъекции за обделку тоннелей в зонах пересечения водоносных горизонтов) рекомендуется использовать гидрофобные пенящиеся полиуретановые смолы, не растворяющиеся в воде.

1.2. Гидрофобные однокомпонентные гидроактивные полиуретановые смолы средней и высокой вязкости (400–2 000 мПа·с). Они не растворяются в воде, а значит, увлекают ее в реакцию полимеризации в фиксированном соотношении. Полимеризация происходит с увеличением в объеме и образованием закрытопористой водонепроницаемой структуры. Нерастворимость в воде (отличие от полиуретановых гелей) и высокая вязкость этих материалов препятствуют их вымыванию при герметизации интенсивных течей с использованием однокомпонентной схемы нагнетания. Указанные смолы также дают возможность эффективно герметизировать стыки элементов сборных тоннельных обделок и водонасыщенные трещины с раскрытием более 0,3–0,5 мм, за счет подобранной вязкости ограничивая потери инъектируемого состава через смежные дефекты. Минимальная ширина раскрытия инъектируемых дефектов зависит от выбранного давления нагнетания, ограничиваемого, как правило, прочностными характеристиками материала ремонтируемой конструкции, а также фактической вязкостью состава при температуре его применения.

К обозначенной группе можно отнести «Тимпанат 100» (2000 мПа·с), «Apiflex – инъекция Н» (400 мПа·с) и НА Flex LV AF (550 мПа·с). В этой группе свойства материалов-аналогов различаются в большей степени (как по вязкости, так и по свойствам эластичности конечного продукта полимеризации). Так, например, «Тимпанат-100» (по сравнению с «Апифлекс Инъекция Н») более вязкий, но при этом характеризуется большей эластичностью после полимеризации. Отдельно следует отметить свойство «Тимпанат 100» сохранять реакционную способность и применяться в условиях низких положительных температур окружающего воздуха и изолируемого массива (около +1–3°C).

1.3. Однокомпонентные гидроактивные полиуретановые смолы низкой вязкости (100–400 мПа·с). Реакция запускается при контакте с водой. К преимуществам этой группы можно отнести высокую проникающую способность, обеспечивающую возможность заполнения волосяных трещин в бетоне без избыточного технологического давления, что позволяет избежать вторичного трещинообразования в слабых и поврежденных конструкциях при производстве инъекционных работ. К ограничениям области применения можно отнести значительные потери материала через смежные дефекты при высокой трещиноватости конструкции, а также (за счет низкой вязкости) избыточные потери материала, выходящего в заобделочное пространство подземных сооружений, при герметизации стыков сборных тоннельных обделок.

Представители вышеназванной группы: «Тимпол 112К» (350 мПа·с); «Тимпол 112КМ» (70–100 мПа·с); «Манопур 2К Флекс» (80–120 мПа·с); MasterRoc MP 355 1K (320 мПа·с). Аналогами данных систем являются DeNeef Conchem

HA Flex SLV (200 мПа·с), HA Cut CFL AF (350 мПа·с), но эти системы поставляются без активатора, который вводится непосредственно перед производством работ.

2. Двухкомпонентные полиуретановые смолы. Они состоят из полиэфирного и изоцианатного компонентов. Технологический процесс изготовления компонентов состоит в механическом смешивании исходных полиэфиров либо изоцианатов с технологическими добавками.

2.1 Нерасширяющиеся двухкомпонентные составы с временем жизни готовой к применению смеси не менее 30 мин, что обеспечивает возможность их инъектирования по однокомпонентной схеме. Вязкость составов от 50 до 150 мПа·с. К указанным составам относятся такие, как «Изолит 2УК» (150 мПа·с), «Тимпол 111НВ» (в двух вариантах: 150–200 мПа·с и 50–70 мПа·с), MC-Injekt 2300 TOP (55 мПа·с), «Манопур 143» (80–120 мПа·с), «Манопур 144» (40–60 мПа·с). Эти материалы не вовлекают в реакцию воду, что в условиях обводнения инъектируемой полости подразумевает необходимость обеспечения путей сброса вытесняемой воды при производстве работ. К ограничениям области применения можно отнести риск вымывания состава при ликвидации активных протечек, поскольку после инъектирования смесь сохраняет высокую подвижность (независимо от контакта с водой). В то же время это свойство обеспечивает высокую проникающую способность материала, а отсутствие вспенивания гарантирует отсутствие усадки после полимеризации. Низкая вязкость составов позволяет использовать их для инъектирования волосяных трещин раскрытием менее 0,3 мм и участков плохо уплотненного бетона. Образец полимеризованного состава, представленный на рис. 2, демонстрирует гомогенную структуру (без признаков образования пор). Пузырьки газа, застывшие в образце, не являются продуктами реакции полимеризации, а были внесены в образец механически при его изготовлении (на стенках сосуда).

Выпускаются также модификации нерасширяющихся двухкомпонентных смол с ускоренным временем реакции, нагнетаемые по двухрастворной схеме. Зачастую эти ускоренные материалы по физико-химическим свойствам идентичны предыдущей группе и отличаются лишь введением катализатора. На практике такие составы редко выбираются в качестве основных, поскольку быстрая потеря подвижности уменьшает область распространения, нивелируя основное преимущество этой группы – высокую проникающую способность. При наличии риска размывания состава активным водопритокком лучше, удобнее с точки зрения технологии использовать составы большей вязкости либо (при большой интенсивности водопритока) одно- и двухкомпонентные составы с активным пенообразованием, входящие в группу, описанную ниже.



Рис. 2. Образец полимеризованного нерасширяющегося двухкомпонентного инъекционного полиуретанового состава

2.2. Двухкомпонентные инъекционные системы с активным пенообразованием, вязкостью от 80 до 350 мПа·с: «Тимпол 228 ТНХ» (300–350 мПа·с и 80–120 мПа·с), MC Montan Injekt LE (компонент А 265 мПа·с, компонент В 210 мПа·с), MasterRoc MP 355 Thix (350 мПа·с), «Манопур 129 Тикс» (350 мПа·с), «Манопур 205» (200 мПа·с), «Магитекс инъекция ПУ 15П» (280 мПа·с).

Материалы данной группы обладают быстрым временем реакции, предопределяющим необходимость применения двухкомпонентной схемы нагнетания. Благодаря быстрому увеличению вязкости и отверждению материалов после смешивания материалы этой группы позволяют снизить риск размывания составов при высокой скорости фильтрации и производить ликвидацию интенсивных водопритоков. В то же время быстрая потеря подвижности уменьшает область распространения составов. В ряде случаев необходимость распространения состава может быть продиктована технологическими соображениями. С другой стороны, ускоренная полимеризация уменьшает глубину проникновения инъектируемого состава в дефектную зону конструкции. При отсутствии показаний к использованию материалов с коротким временем реакции в целях более качественного заполнения дефектов предпочтительно применять составы с большим временем жизни.

Рекомендуемые подрядчиками области применения групп материалов (в зависимости от интенсивности водопритока и ширины раскрытия фильтрующих дефектов) графически представлены на рис. 3.

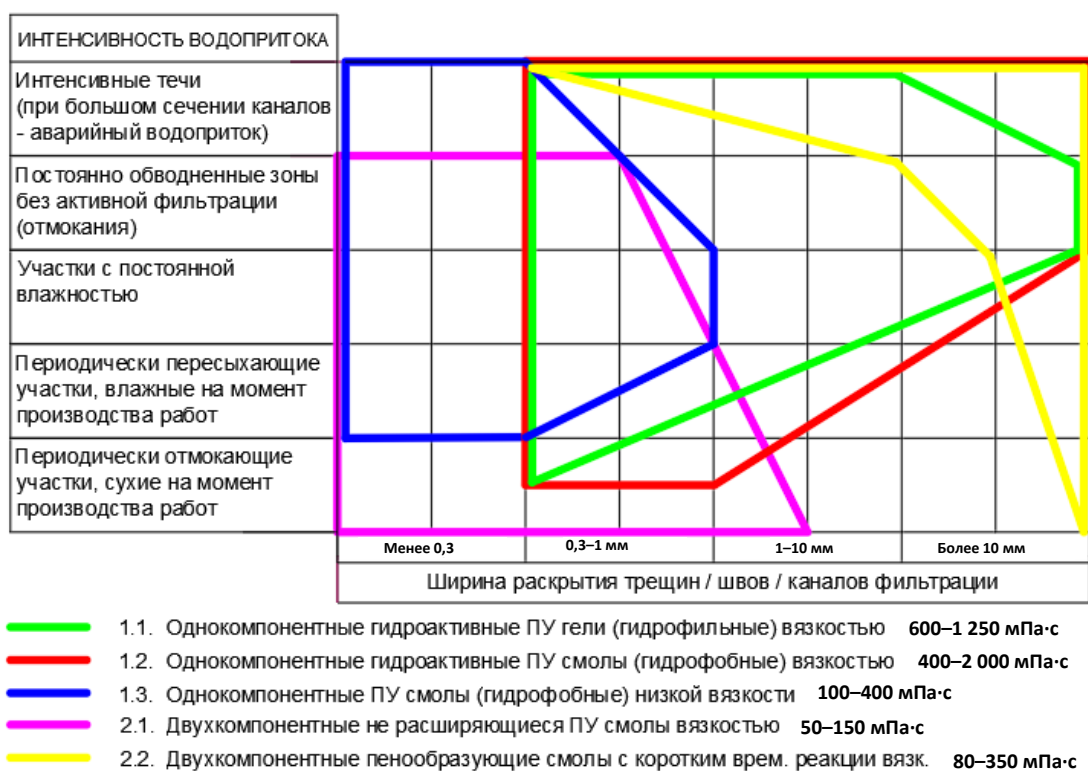


Рис. 3. Графическое отображение областей применения групп материалов в зависимости от интенсивности водопритока и ширины раскрытия дефектов:
ПУ – полиуретановые

Частичное пересечение области применения материала с квадратом условий говорит о возможности использования материала с определенными ограничениями (см. рис. 3). Например, при использовании группы 1.3 для гидроизоляции трещин раскрытием 0,3–1 мм на периодически пересыхающих участках следует учитывать минимальную эксплуатационную влажность конструкции, поскольку при избыточном пересыхании материала возможно появление брака в связи с его усадкой.

Материалы групп 1.1 и 1.2 могут применяться и на сухих в момент производства работ участках конструкции, но для этого должна быть выполнена надежная чеканка (запечатывание) дефектов с целью обеспечить сохранность материала в проинъектированном объеме до установления влажных условий и запуска процесса полимеризации.

Как видно из рис. 3, часть квадратов условий не совпала с областью применения какого-либо из представленных материалов: для герметизации дефектов с переменной влажностью и раскрытием более 1 мм целесообразно использование инъекционных составов, не представленных в таблице (например, на основе цементного вяжущего).

В таблице приведены примеры инъекционных полиуретановых составов, имеющих в настоящее время на российском рынке, с разделением по вышерассмотренным группам.

Группировка близких по свойствам инъекционных полиуретановых составов, обеспечивающих внутригрупповую взаимозаменяемость

Номер и наименование группы	Примеры материалов	Производитель / торговая марка
1	2	3
1.1. Однокомпонентные гидроактивные полиуретановые гели (гидрофильные)	«Тимпанат 101»	ООО «Тимп»
1.2. Однокомпонентные гидроактивные полиуретановые смолы средней и высокой вязкости (гидрофобные)	«Манопур С»	ООО «Гидрозо»
	«Изолит ПУ»	ООО «Полихим Северо-Запад»
	«Apiflex – инъекция S»	ООО «Инновационные технологии»
	«Тимпанат 100»	ООО «Тимп»
1.3. Однокомпонентные гидроактивные полиуретановые смолы низкой вязкости (гидрофобные)	«Apiflex – инъекция Н»	ООО «Инновационные технологии»
	HA Flex LV AF	De Neef
	«Тимпол 112К», «Тимпол 112КМ»	ООО «Тимп»
2.1. Двухкомпонентные полиуретановые смолы без эффекта пенообразования	«Манопур 2К Флекс»	ООО «Гидрозо»
	MasterRoc MP 355 1К	MBCC Group (BASF до 2020 г. [6])
	HA Flex SLV, HA Cut CFL AF	De Neef
	«Изолит 2УК»	ООО «Полихим Северо-Запад»

Окончание таблицы

1	2	3
2.2. Двухкомпонентные полиуретановые смолы с коротким временем реакции и активным пенообразованием	«Тимпол 111НВ»	ООО «Тимп»
	МС-Injekt 2300 TOP	МС-Bauchemie
	«Манопур 143»	ООО «Гидрозо»
	«Манопур 144»	ООО «Гидрозо»
	«Тимпол 228 THIX»	ООО «Тимп»
	МС Montan Injekt LE	МС-Bauchemie
	MasterRoc MP 355 Thix	MBCC Group (BASF до 2020 г.)
	«Манопур 129 Тикс»	ООО «Гидрозо»
	«Магитекс инъекция ПУ 15П»	НПП «РусХимСинтез»
	«Манопур 205»	ООО «Гидрозо»

В приведенный перечень инъекционных полиуретановых составов вошли материалы, использовавшиеся такими подрядными организациями, как ООО «Спецгидроизоляция “Монолит”» и ООО «Гидроизол» при устройстве и восстановлении гидроизоляции в г. Москве, г. Санкт-Петербурге, г. Сочи, г. Кириши, г. Заполярном и других, в том числе в автодорожных тоннелях, тоннелях метрополитена, очистных сооружениях, подземных переходах и паркингах, шахтных стволах, гидротехнических сооружениях [7]. Долговечность и эффективность применения разных групп инъекционных составов была изучена в различных условиях, в том числе при высоком гидростатическом давлении объектов глубокого заложения (рис. 4, 5).



Рис. 4. Алмазное бурение разведочной скважины через пробку заглушенного аварийного участка перегонного тоннеля метрополитена «Пл. Мужества» – «Лесная», г. Санкт-Петербург



Рис. 5. Наглядная демонстрация гидростатического давления на заглушенном участке тоннеля метрополитена «Пл. Мужества» – «Лесная», г. Санкт-Петербург

На сегодняшний день имеется большое количество производителей полиуретановых смол и смесей. Каждый из этих производителей предлагает широкий ассортимент инъекционных составов с разнообразными физико-химическими свойствами. В связи с тем, что не существует подрядчика, имеющего практический опыт применения всего существующего ассортимента, составление таблицы, позволяющей, если необходимо, оперативно производить эквивалентные замены материалов в рабочей документации, должно быть результатом коллективного творчества подрядных организаций. Подрядчики, производящие работы по устройству промышленной гидроизоляции, имеют возможность не только подкрепить свои рекомендации производственным опытом, но и могут взять на себя гарантийные обязательства за результаты работ, выполненных предложенными материалами-аналогами. Составление указанной таблицы специализированных полиуретановых инъекционных составов важно для решения задач импортозамещения, сравнения стоимости вариантов эквивалентных материалов, а также может послужить основой для организации конкурсных торгов на право поставок на объекты подземного строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков Д.В. ООО «БАСФ Строительные системы» – гарантия качества // *Горная промышленность*. 2013. № 4 (110). С. 114.
2. Дианов В.М., Смирнов Ю.Г., Енютин А.Н. Перспективы химического упрочнения приконтурного массива в скальных горных породах // *Разработка мощных месторождений на больших глубинах: Сборник научных исследований по совершенствованию технологических процессов подземной разработки мощных рудных месторождений и перспективам развития производственного объединения «Апатит»*. Апатиты: КНЦ АН СССР. 1983. С. 40–44.

3. Тарасов Б.Г., Ширкес О.А., Филонов Ю.А., Дианов В.М. Результаты экспериментальных исследований деформационно-прочностных свойств тампонажных полиуретановых композиций используемых для гидроизоляции тоннелей метрополитенов // *Подземный город: геотехнология и архитектура: Материалы международной конференции*. СПб.: [б. и.]. 1998. С. 189–194.
4. Дианов В.М., Савич А.В., Пашин К.С., Графкин С.А. Опыт работ по гидроизоляции подземных сооружений // *Записки Горного института*. 2012. Т. 199. С. 145–149.
5. Импортозамещение. Каталог продукции российского производства для обеспечения замещения продукции импортного происхождения (2021 г.). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://krti.gov.spb.ru/importozameshenie/> (дата обращения: 09.03.2023).
6. BASF Construction Chemicals business is now MBCC Group [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mbcc-group.com/en/news/press-releases/basf-construction-chemicals-business-is-now-mbcc-group-and-ready-for-business/> (дата обращения: 22.03.2023).
7. Научно-производственное предприятие «Спецгидроизоляция “Монолит”»: официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://hydrois.ru/> (дата обращения: 22.03.2023).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУЛЬКОВ Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкции и сооружения», ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: kulkovsa@yandex.ru

САВИЧ Андрей Владиславович – исполнительный директор научно-производственного предприятия «Спецгидроизоляция “Монолит”», 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Торжковская, д. 13, корп. 1, лит. А. E-mail: savitch@rambler.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Кульков С.А., Савич А.В. Инъекционные полиуретановые составы для промышленной гидроизоляции: подбор материалов-аналогов в условиях импортозамещения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 2 (18). С. 85–96.

INJECTABLE POLYURETHANE COMPOUNDS FOR INDUSTRIAL WATERPROOFING: CLASSIFICATION TABLE OF SUBSTITUTE MATERIALS IN CONDITIONS OF IMPORT SUBSTITUTION

S.A. Kulkov, A.V. Savich
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article is devoted to polyurethane injection compounds used for waterproofing of underground structures. Based on the practical experience of contractors, proposals are given for compiling a table of substitute materials to ensure their interchangeability in design solutions.

Keywords: injection compounds, resin injection, sealing, polyurethane grouts, waterproofing, polyurethane, polyurethane resins, hydroactive resins, import substitution.

REFERENCES

1. Lykov D.V. BASF Construction Systems LLC is quality assurance. *Gornaya promyshlennost'*. 2013. No. 4 (110), p. 114. (In Russian).
2. Dianov V.M., Smirnov Yu.G., Enyutin A.N. Prospects of chemical hardening of the contour array in rocky rocks. *Development of powerful deposits at great depths: A collection of scientific studies on improving the technological processes of underground mining of powerful ore deposits and prospects for the development of «Apatit» production association*. Apatity: KNC of the USSR Academy of Sciences. 1983, pp. 40–44. (In Russian).
3. Tarasov B.G., Shirkes O.A., Filonov Yu.A., Dianov V.M. Results of experimental studies of deformation and strength properties of grouting polyurethane compositions used for waterproofing subway tunnels. *Underground City: Geotechnology and Architecture: Proceedings of the International Conference*. St.-Petersburg: [w. pub.]. 1998, pp. 189–194. (In Russian).
4. Dianov V.M., Savich A.V., Pashin K.S., Grafkin S.A. Experience in waterproofing underground structures. *Zapiski Gornogo instituta*. 2012. Vol. 199, pp. 145–149. (In Russian).
5. Import substitution. Catalog of Russian-made products to ensure the replacement of products of imported origin (2021) [Electronic resource]. – Access mode: <https://krti.gov.spb.ru/importozameshenie/> (date of access: 09.03.2023). (In Russian).
6. BASF Construction Chemicals business is now MBCC Group [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mbcc-group.com/en/news/press-releases/basf-construction-chemicals-business-is-now-mbcc-group-and-ready-for-business/> (date of access: 22.03.2023).
7. Scientific and production enterprise «Special waterproofing “Monolit”»: official website [Electronic resource]. – Access mode: <http://hydrois.ru/> (date of access: 22.03.2023).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

SAVICH Andrey Vladislavovich – Executive Director of Research and Production Enterprise «Special waterproofing “Monolit”», l. A, b. 1, 13, Torzhkovskaya str., Saint-Petersburg, 197342, Russia. E-mail: sawitch@rambler.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kulkov S.A., Savich A.V. Injectable polyurethane compounds for industrial waterproofing: classification table of substitute materials in conditions of import substitution // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 2 (18), pp. 85–96.

**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, Блумингтон, США

Ковалев К.Л. – д.т.н., профессор МАИ

Колесников Александр Сергеевич – 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, 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

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

Трещев А.А. – д.т.н., профессор ТулГУ

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

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

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

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

**ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал
№ 2 (18), 2023

Редактор Ю.А. Якушева
Корректор С.В. Зорикова

Дата выхода в свет 27.10.2023

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