

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тверской государственный технический университет»  
(ТвГТУ)

**ВЕСТНИК  
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Строительство.  
Электротехника и химические технологии»**

**Научный рецензируемый журнал**

**№ 4 (20), 2023**

Тверь 2023

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2023. № 4 (20). 116 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> Биокomпозиты строительного назначения с использованием отходов деревообработки. Часть 4 (определение расчетных прочностных характеристик биологически активированного опилкобетона).....	5
<i>Левиков А.В., Гавриленко А.В.</i> Экспериментальное исследование несущей способности газобетонных клееных перемычек при изгибе.....	11
<i>Мицкевич А.С., Курятников Ю.Ю.</i> Самоуплотняющиеся бетоны на основе техногенных отходов .....	17
<i>Москвина Ю.Н.</i> Вопросы стандартизации аддитивных технологий в строительстве.....	23
<i>Трофимов В.И.</i> Эффективные дорожные и аэродромные покрытия для строительства на Севере.....	27
<i>Филимонова Ю.С., Ткач Е.В., Сусанина Т.В.</i> Модифицированный бетон для гидромелиоративного строительства.....	34

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Иванов П.Г., Корнеев К.Б.</i> Анализ влияния генераторов тепловых электростанций на режимы работы электросети крупного города России .....	45
<i>Качановский Ф.В.</i> Влияние метеофакторов на электропроводность осадков, выпавших в Твери в 2016–2022 гг.....	50
<i>Макаров А.Н.</i> Проверка на соответствие истине законов теплового излучения газовых объемов. Часть I. Примеры расчетов по законам теплового излучения цилиндрических газовых объемов .....	58
<i>Макаров А.Н.</i> Проверка на соответствие истине законов теплового излучения газовых объемов. Часть II. Примеры расчетов по законам теплового излучения цилиндрических и сферических газовых объемов.....	66
<i>Шум Ал.А., Ветошкин А.М.</i> Теорема о центре $n$ -симметрии выпуклого пространственного тела .....	76

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Бабаев Д.Д., Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Завадько М.Ю.</i> Синтез геополимерных композиций на основе щелочных техногенных продуктов топливных станций .....	83
<i>Филиппова О.П., Калаева С.З., Цховребов Э.С., Сергеев Е.С.</i> Технологические аспекты экологически безопасной утилизации отработанных масел.....	91
<i>Иванов Г.Н., Кривенко И.В., Смирнова М.А., Испирян С.Р.</i> Исследование изменения спектрального состава упругого импульса при отражении и прохождении через сапропель.....	97
<i>Смирнова С.А., Любкевич И.А., Зорин А.И., Миронов Е.А., Молчанов В.П.</i> Разработка методики биотестирования in vitro лизоцимсодержащих субстанций для совершенствования технологий производства препаратов с антимикробной активностью.....	105

# CONTENTS

## CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<i>Belov V.V.</i> Construction biocomposites using woodworking waste. Part 4 (determination of design strength biologically activated characteristics sawdust concrete).....	5
<i>Levikov A.V., Gavrilenko A.V.</i> Experimental study of bending bearing capacity of glued aerated concrete lintels .....	11
<i>Mitskevich A.S., Kuryatnikov Yu.Yu.</i> Self-compacting concrete based on man-made waste .....	17
<i>Moskvina Yu.N.</i> Standardization of additive technologies in construction .....	23
<i>Trofimov V.I.</i> Efficient road and airport pavements for construction in the North.....	27
<i>Filimonova Yu.S., Tkach E.V., Susanina T.V.</i> Modified concrete for water reclamation construction.....	34

## ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Ivanov P.G., Korneev K.B.</i> Analysis of the influence of generators of thermal power plants on the operating modes of the power grid of a large Russian city .....	45
<i>Kachanovsky F.V.</i> Influence of meteorological conditions upon the electrical conductivity of the precipitation in Tver during 2016–2022 years.....	50
<i>Makarov A.N.</i> Verification for the correspondence to the truth of the laws of thermal radiation of gas volumes. Part I. Examples of calculations according to the laws of thermal radiation of cylindrical gas volumes.....	58
<i>Makarov A.N.</i> Checking the laws of thermal radiation of gas volumes for the correspondence to the truth. Part II. Examples of calculations according to the laws of thermal radiation of cylindrical and spherical gas volumes.....	66
<i>Shum Al.A., Vetoshkin A.M.</i> Theorem on the center of $n$ -symmetry of a convex spatial body .....	76

## CHEMICAL TECHNOLOGY

<i>Babaev D.D., Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Zavadko M.Yu.</i> Synthesis of geopolymer compositions based on alkaline technogenic products of fuel stations.....	83
<i>Filippova O.P., Kalaeva S.Z., Tskhovrebov E.S., Sergeev E.S.</i> Technological aspects of environmentally safe disposal of waste oils.....	91
<i>Ivanov G.N., Krivenko I.V., Smirnova M.A., Ispiryayn S.R.</i> Research changes in elastic pulse' spectral composition during reflection and passage through a sapropel.....	97
<i>Smirnova S.A., Lyubkevich I.A., Zorin A.I., Mironov E.A., Molchanov V.P.</i> Development of methods for in vitro biotesting of lysozyme-containing substances to improve the production technologies of drugs with antimicrobial activity.....	105

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

УДК 691.11

**БИОКОМПОЗИТЫ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБОТКИ.  
ЧАСТЬ 4 (ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ  
ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОГО ОПИЛКОБЕТОНА)*****В.В. Белов****Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Белов В.В., 2023

**Аннотация.** Обоснована возможность применения биологически активированного опилкобетона в малоэтажном строительстве. Рассчитаны значения нормативного начального и длительного модулей деформаций в пределах стандартных значений температуры и влажности для разработанных малоэнергоёмких составов опилкобетона. Отмечено, что определенные в настоящей работе расчетные прочностные характеристики опилкобетона на биологически активированном заполнителе позволяют рекомендовать его для использования в ограждающих конструкциях зданий различного назначения.

**Ключевые слова:** биологически активированный опилкобетон, составы, расчетные прочностные характеристики.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-5-11*****ВВЕДЕНИЕ***

Наши предварительные исследования по данной теме [1–5]<sup>1</sup> 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 было 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 древесного и другого растительного сырья, позволяющих экономить энергоноситель и

---

<sup>1</sup> 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).

исходное сырье, улучшить физико-механические и санитарно-гигиенические свойства материалов, избежать применения дефицитных и в некоторых случаях вредных химических веществ.

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

В части 2 настоящей работы [7] были изучены способы биоферментации древесного заполнителя с целью его использования в качестве заполнителя для легких бетонов и других строительных материалов. Эта обработка древесного сырья дает возможность получить строительные материалы, удовлетворяющие требованиям стандарта, даже на основе 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. Получены опытные образцы биологически активированного древесного заполнителя и определены его основные физико-химические свойства.

В части 3 настоящей работы [8] были разработаны оптимальные составы биологически активированного опилкобетона с использованием математических моделей. Уточненные математические модели зависимостей типа «состав–свойства» биокompозита позволили оптимизировать его состав и получить требуемые строительно-технические показатели.

Целью данной научно-исследовательской работы являлось определение расчетных прочностных характеристик опилкобетона на биологически активированном заполнителе для использования в ограждающих конструкциях зданий различного назначения.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Расчетные сопротивления опилкобетона осевому сжатию  $R_b$  и растяжению  $R_{bt}$  при расчете конструкций по предельному состоянию первой группы определяются по формулам [9]:

$$R_b = \frac{R_{bn}}{\gamma_{bc}} \cdot \eta(\tau); \quad R_{bt} = \frac{R_{bnt}}{\gamma_{bc}} \cdot \eta(\tau),$$

где  $R_{bn}$  и  $R_{bnt}$  – соответственно нормативная призмная прочность и нормативное сопротивление опилкобетона осевому растяжению, определяемые из выражений:

$$R_{bn} = k_n \cdot B = k_n \cdot \bar{R} (1 - t_R^H \cdot V_R); \quad R_{bnt} = k_p \cdot B = k_p \cdot \bar{R} (1 - t_R^H \cdot V_R).$$

В последних выражениях  $B$  – класс опилкобетона по прочности на сжатие;  $\bar{R}$  – среднее значение кубиковой прочности опилкобетона;  $k_n$  и  $k_p$  – коэффициенты призмной прочности и осевого растяжения опилкобетона, значения которых (по данным статьи [9]) составляют соответственно 0,9 и 0,2;  $\eta(\tau)$  – коэффициент длительного сопротивления, определяемый по формуле [10]

$$\eta(\tau) = 1,02 - 0,04 \lg \tau.$$

Последняя зависимость отвечает концепции [11], в соответствии с которой изменение прочности деревобетонов с течением времени для различных видов напряженного состояния, как и для древесины, имеет одинаковый характер. Для оптимального срока службы зданий из опилкобетона  $\tau = 50$  лет ( $\tau = 1,58 \times 10^9$  с;  $\lg \tau = 9,2$ )

при действии полной расчетной нагрузки (сочетание нагрузок, принятое за базисное) коэффициент  $\eta(\tau) = 0,65$ .

Коэффициент надежности по материалу в предыдущих формулах определяется из выражения [9]

$$\gamma_{bc} = \frac{1 - t_R^H \cdot V_R}{1 - t_R \cdot V_R},$$

где  $t_R^H$  и  $t_R$  – коэффициенты ( $t_R^H < t_R$ ), зависящие от принятого уровня обеспеченности и вида функции распределения плотности вероятности прочности опилкобетона;  $V_R$  – нормируемый коэффициент вариации кубиковой прочности материала, принимаемый в соответствии с рекомендациями ГОСТ 19222 равным 20 %.

Для аппроксимации результатов испытаний прочности конструкционных древесных бетонов использовалась система кривых Пирсона [9]. Как показал анализ этих опытных данных, все они описываются кривыми Пирсона первого и второго типов. В статье [9] построены кривые плотности вероятности распределения прочности и вычислены значения нормирующих множителей  $t_R^H$  и  $t_R$ , а также коэффициента надежности  $\gamma_{bc}$ . Для принятой в строительных нормах обеспеченности нормативного и расчетного сопротивлений, равной соответственно 0,95 и 0,99, значения коэффициентов составили  $t_R^H = 1,54$ ;  $t_R = 1,8$  и  $\gamma_{bc} = 1,1$ .

Весовая влажность опилкобетона даже при относительной влажности воздуха  $\varphi = 100$  % не превышает 5 %, а при  $\varphi = 50$  % влажность опилкобетона в зависимости от состава изменяется в пределах 1...2 % [12]. Поэтому нормирование расчетных характеристик опилкобетона, так же как и конструкционной древесины и арболита, предлагается осуществлять при определенной стандартной влажности 3 % по массе. В табл. 1 приведены значения нормируемых характеристик прочности опилкобетона разных марок по прочности в возрасте 28 суток для стандартной влажности и температуры 20 °С [9].

Таблица 1

Характеристики прочности опилкобетона в возрасте 28 суток

Вид сопротивления	Класс по прочности на сжатие, нормативные и расчетные сопротивления для проектных марок опилкобетона			
	M10	M15	M25	M35
Класс по прочности В, МПа	B0,7	B1	B2	B2,5
Нормативная призмная прочность $R_{bn}$ , МПа	0,63	0,9	1,8	2,25
Расчетное сопротивление сжатию $R_b$ , МПа	0,37	0,53	1,06	1,33
Нормативное сопротивление опилкобетона растяжению $R_{btн}$ , МПа	0,14	0,2	0,4	0,5
Расчетное сопротивление растяжению $R_{bt}$ , МПа	0,083	0,12	0,24	0,3

При расчете конструкций на сочетание нагрузок, отличных от сочетания базисного, табличные значения расчетных сопротивлений умножаются на коэффициент условий работы  $m$ , принимаемый, согласно исследованиям [18, 19], равным 1,1 при совместном действии постоянной и кратковременной снеговой нагрузки, 1,25 – при совместном действии постоянной и кратковременной ветровой нагрузки.

Начальный модуль деформаций  $E_b$  является одной из важнейших характеристик деформативных свойств опилкобетона. В статье [11] приведена эмпирическая зависимость для определения начального модуля деформаций опилкобетона  $E_b$ , МПа в виде

$$E_b = 0,27\rho_0 \cdot \sqrt{R},$$

где  $\rho_0$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $R$  – кубиковая прочность, кг/см<sup>2</sup>.

Обладая достаточной для малоэтажного строительства прочностью, опилкобетон характеризуется невысоким значением модуля деформаций. Поэтому расчет на устойчивость и второе предельное состояние могут оказаться определяющими при назначении размеров сечений конструкций с применением опилкобетона. В связи с этим отмечается [11] недостаточная правомочность использования при расчете конструкций из древесных бетонов, например из арболита (СН 549-82), средних, а не нормативных значений начального модуля деформаций. Поскольку модуль деформаций, как и прочность и плотность материала, является случайной величиной, то в последнюю формулу вместо  $R$  подставляются класс материала по прочности  $B$  и минимальное значение плотности, вычисленное с обеспеченностью 0,95, т.е. [11]

$$E_b^H = 0,27\rho_{\min} \cdot \sqrt{B}.$$

Для определения  $\rho_{\min}$  воспользуемся зависимостью [11]

$$\rho_{\min} = \rho \cdot (1 - t_p^H \cdot V_p),$$

в которой значения нормирующего множителя  $t_p^H$  и коэффициента вариации по плотности  $V_p$  определены с учетом распределения Пирсона с обеспеченностью 0,95. Средние значения этих параметров составили  $t_p^H = 1,54$  и  $V_p = 7\%$ . С учетом этого

$$\rho_{\min} = \rho \cdot (1 - 1,54 \times 0,07) = 0,892\rho.$$

При расчете строительных конструкций из опилкобетона на устойчивость [12] и прочность по деформированной схеме и прогибам [11] используется длительный модуль деформаций  $E(\tau)$ , определяемый по формуле [11]

$$E(\tau) = \frac{E_b^H}{1 + \varphi(\infty)},$$

где  $\varphi(\infty) = 5,67$  – предельная характеристика ползучести опилкобетона, полученная по результатам длительных испытаний стандартных образцов с весовой влажностью материала, равной 3% [12].

В табл. 2 приведены рассчитанные по указанным выше формулам значения нормативного начального и длительного модулей деформаций опилкобетона в диапазоне плотности этого материала, охватывающего его теплоизоляционное и теплоизоляционно-конструкционное назначение, для стандартных значений температуры и влажности.

Таблица 2

Нормативные начальный и длительный модули деформаций опилкобетона  
в зависимости от плотности при соответствующих марках по прочности

Наименование показателей	Нормативные значения нормативного начального и длительного модулей деформаций опилкобетона для марок по прочности			
	M10	M15	M25	M35
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	600	700	700	800
Нормативный начальный модуль деформаций $E_b^H$ , МПа	125	169	238	305
Длительный модуль деформаций $E(\tau)$ , МПа	18,8	25,3	35,7	45,7

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования по данной теме позволили установить возможность улучшения древесного заполнителя путем его биоферментации с помощью микроорганизмов, содержащихся в субстрате животного происхождения – отходе животноводства. Предлагаемая обработка древесного сырья, в частности отходов деревообработки – опилок, делает возможным получение строительных материалов высокого качества. Уточненные математические модели зависимостей типа «состав–свойства» биокompозита дали возможность оптимизировать его состав и получить требуемые строительно-технические показатели. Определенные в настоящей работе расчетные прочностные характеристики опилкобетона на биологически активированном заполнителе позволяют рекомендовать его для использования в ограждающих конструкциях зданий различного назначения.

### 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*.

университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 1 (17). С. 14–26.

7. 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.

8. Белов В.В. Биокompозиты строительного назначения с использованием отходов деревообработки. Часть 3 (подбор составов биологически активированного опилкобетона) // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 3 (19). С. 19–33.

9. Цапаев В.А., Важаев В.П. Использование кривых Пирсона при анализе распределения прочности арболита в отформованных конструкциях // *Изв. вузов. Строительство*. 1992. № 7-8. С. 69–75.

10. Цапаев В.А. Длительная прочность легких бетонов на древесных заполнителях // *Изв. вузов. Строительство*. 1989. № 1. С. 59–61.

11. Цапаев В.А. Нормирование расчетных характеристик опилкобетона // *Изв. вузов. Строительство*. 1998. № 11-12. С. 50–54.

12. Цапаев В.А. Исследование длительной прочности и деформативности опилкобетона при ступенчато-возрастающих напряжениях сжатия // *Изв. вузов. Строительство*. 1991. № 2. С. 37–42.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В. Биокompозиты строительного назначения с использованием отходов деревообработки. Часть 4 (определение расчетных прочностных характеристик биологически активированного опилкобетона) // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 4 (20). С. 5–11.

---

### CONSTRUCTION BIOCOPPOSITES USING WOODWORKING WASTE. PART 4 (DETERMINATION OF DESIGN STRENGTH BIOLOGICALLY ACTIVATED CHARACTERISTICS SAWDUST CONCRETE)

*V.V. Belov*

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The possibility of using biologically activated sawdust concrete in low-rise construction is justified. The values of the normative initial and long-term deformation modules are calculated within the standard values of temperature and humidity for the developed low-energy compositions of sawdust concrete. Design strength characteristics of sawdust concrete on

biologically active aggregate determined in this work make it possible to recommend it for use in enclosing structures of buildings for various purposes.

**Keywords:** biologically activated sawdust concrete, compositions, design strength characteristics.

#### 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 4 (determination of design strength biologically activated characteristics sawdust concrete) // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 5–11.

УДК 691-431, 692.299

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГАЗОБЕТОННЫХ КЛЕЕНЫХ ПЕРЕМЫЧЕК ПРИ ИЗГИБЕ

*А.В. Левиков, А.В. Гавриленко*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Левиков А.В., Гавриленко А.В., 2023

**Аннотация.** В статье приведено краткое описание нескольких часто используемых на практике вариантов устройства перемычек над проемами в ненесущих стенах и перегородках из газобетонных блоков, указываются их недостатки. Рассмотрен вариант перемычки, представляющей собой элемент, составленный из нескольких блоков, склеенных по торцам кладочной клей-пенной. Дано описание изготовленных образцов таких перемычек, рассмотрены методика и результаты их испытаний на изгиб. Показано, что перемычки пролетом 1,1 м с размерами сечения 100 × 250 мм, выполненные из блоков D400 класса по прочности В2,5, способны выдерживать распределенную нагрузку до 100 кг/м, однако их разрушение происходит хрупко, в связи с чем использование их на практике в настоящий момент не может быть в полной мере рекомендовано. Представлены возможные направления совершенствования конструкции клееных перемычек.

**Ключевые слова:** газобетон, клей-пена, перемычка, испытание на изгиб, несущая способность.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-11-16

### **ВВЕДЕНИЕ**

Сочетая приемлемую несущую способность и удовлетворительные теплофизические свойства, газобетон в настоящее время является весьма популярным материалом при возведении стен малоэтажных и индивидуальных жилых зданий [1, 2]. В ряде климатических районов России стены из газобетона могут вовсе не требовать дополнительного утепления, а в других районах может потребоваться устройство дополнительного слоя утеплителя (как правило, относительно небольшой толщины) [3]. При этом несущая способность стен из газобетонных блоков наиболее распространенных классов по прочности В2,5 и В3,5 на клей-пене оказывается достаточной для восприятия нагрузок от деревянных перекрытий жилых зданий и (при устройстве армированных поясов) также перекрытий из облегченных пустотных плит типа ПНО [4, 5, 6]. Нельзя не отметить и удобство работы с изделиями – крупные размеры блоков способствуют быстрому возведению больших объемов кладки, при этом блок способен перемещать даже один рабочий. Возможность использования клеевых кладочных составов позволяет отказаться от мокрых процессов на строительной площадке и убрать мостики холода в виде швов из цементно-песчаного раствора [3].

Для устройства перемычек в стенах зданий, сделанных из газобетонных блоков, производителями создается широкая номенклатура перемычечных изделий. Однако стоят они дороже рядовых стеновых блоков, а их применение в ряде случаев представляется застройщикам экономически нецелесообразным. Вместо этого в ненесущих стенах из газобетона распространены перемычки в виде прокатных уголков или пары стержней арматуры диаметром порядка 16 мм. При кажущемся удобстве и простоте монтажа такие перемычки в дальнейшем создают проблемы во время отделки и эксплуатации зданий. Так, имеют место трудности с нанесением штукатурных растворов на гладкую поверхность прокатного уголка. Далее, при эксплуатации здания, металлические профили или арматурные стержни могут корродировать и портить внешний вид финишной отделки, вызывая необходимость проведения ремонтных работ.

Альтернативным вариантом, доступным частным застройщикам, оказывается устройство перемычек, составленных по длине из нескольких отрезков рядовых блоков, склеенных между собой по торцам при помощи кладочной клей-пены.

В предлагаемой статье проведено экспериментальное исследование несущей способности таких перемычек при изгибе и сделаны выводы о возможностях их применения и вероятных путях улучшения их эксплуатационных показателей.

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Для изготовления клеевых газобетонных перемычек были приобретены 3 стеновых газобетонных блока номинальными размерами  $250 \times 400 \times 600$  мм с маркой по плотности D400 и классом по прочности при сжатии В2,5.

Для контроля плотности материала и проверки его прочности при сжатии из блоков были вырезаны 4 образца с номинальными размерами  $100 \times 100 \times 100$  мм. По результатам взвешивания и испытаний на сжатие были установлены фактическая плотность материала блоков, которая оказалась равной  $444,7 \text{ кг/м}^3$ , а также прочность материала блоков при сжатии, которая составила  $0,21 \text{ кН/см}^2$ .

Для изготовления перемычек блоки были распилены вдоль обычной ножовкой. Размеры заготовок составили соответственно  $l \times b \times h = 600 \times 100 \times 250$  мм. Каждая перемычка формировалась склеиванием торцов двух заготовок. Склеивание производилось

при помощи кладочной клей-пены, приобретенной в местном крупном строительном магазине. При этом соблюдалась технология работ, рекомендованная на таре клей-пены. В частности, торцы заготовок перед склеиванием очищались от пыли, далее на одну из заготовок наносилась одна полоска клей-пены, после чего на пену устанавливалась вторая заготовка. Заготовки плотно сжимались и оставлялись в вертикальном положении на одни сутки для твердения клея (рис. 1). Всего для исследований было заготовлено 3 образца перемычек.



Рис. 1. Твердение образцов клееных газобетонных перемычек

Спустя сутки перемычки были испытаны на изгиб. Расчетная схема перемычек в испытании соответствовала свободно опертой шарнирной балке. Нагрузка прикладывалась к образцам при помощи гидравлического домкрата в двух точках через траверсу. Точки приложения нагрузок отстояли от опор на величину порядка  $1/3$  пролета. Схема испытаний приведена на рис. 2, а общий вид перемычки, установленной в испытательную установку, показан на рис. 3.

Нагрузка прикладывалась к образцам ступенями. Величина приложенного усилия измерялась динамометром системы Токаря на 0,3 тс. Кроме того, в ходе испытаний при помощи прогибомера ПМ-3 с ценой деления 0,1 мм измерялся прогиб перемычек в середине пролета.

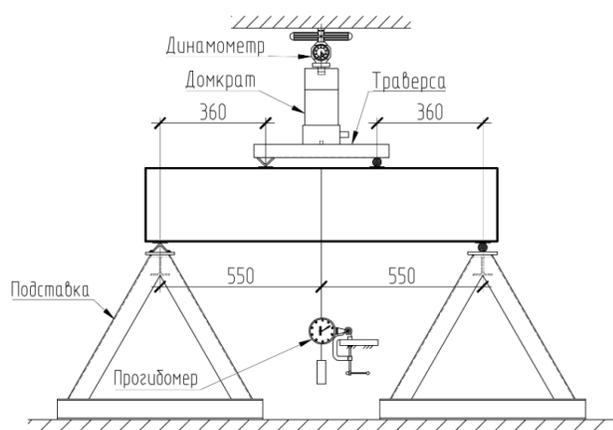


Рис. 2. Схема испытаний перемычек на изгиб



Рис. 3. Общий вид перемычки, помещенной в испытательную установку

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Величина предельной нагрузки, воспринятая блоками, а также прогиб на ступени, предшествующей разрушению, представлены в таблице. Нагрузки, приведенные в таблице, учитывают массу траверсы, домкрата и динамометра.

## Результаты испытаний перемычек на изгиб

Наименование параметра	Величина по образцам		
	Перемычка 1	Перемычка 2	Перемычка 3
Суммарная предельная внешняя нагрузка, кг	110,41	118,06	90,03
Предельный момент сечения, кг·см, без учета собственного веса	1 987,34	2 125,04	1 620,50
Прогиб на ступени нагружения, предшествующей разрушению, мм	0,6	0,8	0,7

Все исследованные перемычки разрушились хрупко в середине пролета вследствие отслоения тонкого слоя материала блоков, пропитанного клеем, от тела блоков. Хотя визуально толщина отслоившегося материала возле шва составила менее 1 мм, следует сделать вывод, что разрушение происходило по материалу блоков, а не по клеевому шву. При этом необходимо учесть, что материал по наружной поверхности блоков может быть ослаблен вследствие контакта с маслом, которым покрываются стенки форм при изготовлении блоков, а также в результате механических и климатических воздействий на данный слой в процессе транспортировки и хранения.

Внешний вид торцевых участков блоков после разрушения перемычки показан на рис. 4.



Рис. 4. Типичный вид торцов блоков после разрушения перемычки

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В работе исследовались несущая способность и прогиб газобетонных перемычек, полученных склеиванием частей обычных стеновых блоков кладочной клей-пенной. Было установлено, что предельный момент сечения рассмотренных перемычек составляет в среднем 1 910,96 кг·см, а средний прогиб на ступени нагружения, предшествующей разрушению, оказался равным 0,7 мм.

Перемычки разрушаются хрупко, не развивая визуальных признаков, по которым можно было бы сделать суждение о скором исчерпании несущей способности. По воспринятой нагрузке рассмотренные перемычки соответствуют брусковым ненесущим перемычкам типа 8ПБ (порядка 100 кг/м), однако, по мнению авторов, в данный момент не вполне могут заменить последние в ненесущих перегородках стен из газобетонных блоков в силу неудовлетворительного – хрупкого – характера разрушения и недостаточного количества проведенных испытаний, на основании которых можно было бы сделать выводы о пределах безопасного использования клееных газобетонных перемычек.

С целью дальнейшего усовершенствования рассмотренной конструкции могут быть предложены изделия, составленные из 3 частей, с полноценным блоком длиной 600 мм в средней части и двумя половинками блока длиной по 300 мм по краям. Возможно также усиление стыков клеейкой коротышей из композитной арматуры в предварительно засверленные отверстия в торцах составных блоков. Для снижения риска хрупкого разрушения элементов могут быть рассмотрены варианты усиления их растянутой зоны кладочной базальтовой сеткой.

Учитывая преимущества описанных перемычек, среди которых следует выделить простоту изготовления, дешевизну и сохранение однородности стены, тему изучения и поиска способов улучшения свойств клееных газобетонных перемычек можно считать актуальной и требующей проведения дополнительных теоретических и экспериментальных изысканий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гринфельд Г.И., Вишневецкий А.А. Рынок автоклавного газобетона России в 2020 г. // *Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 11-й международной научно-практической конференции*. Минск: Стринко. 2021. С. 13–17.
2. Рынок автоклавного газобетона: краткий обзор исследования, проведенного инвестиционно-аналитической группой «ПКР». URL: <https://prcs.ru/analytics-article/rynok-avtoklavno-gazobetona/> (дата обращения: 17.09.2023).
3. Конструктивные решения и особенности расчета теплозащиты наружных стен зданий на основе автоклавных газобетонных блоков / А.И. Бедов [и др.] // *Вестник МГСУ*. 2012. Вып. 2. С. 98–103.
4. Повышение теплотехнической однородности стен из ячеисто-бетонных изделий за счет использования в кладке полиуретанового клея / А.С. Горшков [и др.] // *Строительные материалы*. 2014. № 5. С. 57–64.
5. Деркач В.Н. Прочность и деформативность каменной кладки из ячеисто-бетонных блоков автоклавного твердения на полиуретановых швах. Часть 1. Прочность и деформативность при сжатии // *Строительные материалы*. 2017. № 5. С. 29–32.
6. Малахова А.Н., Балакшин А.С. Применение стеновых мелких блоков из ячеистых бетонов в несущих стенах зданий средней этажности // *Вестник МГСУ*. 2013. Вып. 1. С. 87–93.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

*ГАВРИЛЕНКО Алексей Владимирович* – старший преподаватель кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: gawaw@mail.ru

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Левиков А.В., Гавриленко А.В. Экспериментальное исследование несущей способности газобетонных клееных перемычек при изгибе // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 4 (20). С. 11–16.

---

## EXPERIMENTAL STUDY OF BENDING BEARING CAPACITY OF GLUED AERATED CONCRETE LINTELS

*A.V. Levikov, A.V. Gavrilenko*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article gives a brief description of several variants of lintels over openings in non-load-bearing walls and partitions made of aerated concrete blocks, their disadvantages are indicated. The variant of the lintel is described, which is an element made of several blocks glued at the ends with masonry glue-foam. The description of made samples of such lintels is given, the methodology and results of their bending tests are considered. It is shown that lintels of 1.1 m span with cross-section dimensions 100 × 250 mm, made of D400 blocks of strength class B2.5, are able to withstand distributed load up to 100 kg/m, but their destruction is brittle, in connection with which their use in practice at the moment cannot be fully recommended. Possible directions for improving the design of glued lintels are presented.

**Keywords:** aerated concrete, foam adhesive, lintel, bending test, bearing capacity.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

*GAVRILENKO Alexey Vladimirovich* – Senior Teacher of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: gawaw@mail.ru

### CITATION FOR AN ARTICLE

Levikov A.V., Gavrilenko A.V. Experimental study of bending bearing capacity of glued aerated concrete lintels // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 11–16.

УДК 691.3

**САМОУПЛОТНЯЮЩИЕСЯ БЕТОНЫ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ***А.С. Мицкевич, Ю.Ю. Курятников**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Мицкевич А.С., Курятников Ю.Ю., 2023

**Аннотация.** В статье представлены результаты разработки самоуплотняющихся бетонов (СУБ) для изготовления малых архитектурных форм (МАФ). Отмечено, что при организации производства МАФ из-за небольших размеров, тонких стенок и сложной геометрической формы изделий применение традиционных бетонных смесей с крупным заполнителем затруднительно, поэтому в заводских условиях для изготовления МАФ целесообразно применять безвибрационную технологию из высокоподвижных самоуплотняющихся смесей, а в качестве минерального сырья использовать техногенные отходы (мелкий и крупный заполнители из бетонного лома) для снижения себестоимости.

**Ключевые слова:** самоуплотняющийся бетон, бетонный лом, техногенные отходы, молотый доменный шлак, модификаторы.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-17-23****ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время в строительной отрасли все больше внимания уделяется энерго- и ресурсоэффективным материалам. В современном строительстве зданий и сооружений все шире используются высокотехнологичные бетонные смеси, способные без применения какого-либо внешнего механического воздействия самостоятельно заполнять опалубку, в том числе густоармированную, либо со сложной геометрической формой, сохраняя при этом связность и однородность [1].

Применение самоуплотняющегося бетона (СУБ) обеспечивает экономию затрат, позволяет отказаться от использования специального оборудования для уплотнения смеси, повышает скорость производства работ [2]. Самоуплотняющийся бетон – высокотехнологичный материал, свойства которого в значительно большей степени, чем характеристики обычного бетона, связаны со свойствами и точностью дозировки материалов, применяемых для его изготовления [3].

Несмотря на имеющиеся разработки отечественных ученых, комплексной зависимости «состав – структура – свойства» для СУБ на настоящее время еще не разработано. Структурные параметры бетона, такие как объемная концентрация цементного теста, истинное водоцементное отношение  $V/C_{ис}$  и водопотребность наполнителей, заполнителей и минеральных добавок, являются универсальными величинами для оценки и регулирования свойств и структуры бетона в процессе производства [4]. Установка таких зависимостей – актуальное научное направление в теории проектирования СУБ. По причине высокого расхода цемента, минеральных добавок и значительного объемного содержания растворной составляющей в смеси СУБ обладают пониженным модулем упругости и повышенными деформациями усадки по сравнению с бетонами из жестких смесей и смесей с подвижностью П1–П4 [5]. Кроме этих

недостатков, стоит отметить, что высокая стоимость и большие расходы дорогих компонентов смеси приводят к значительному удорожанию 1 м<sup>3</sup> смеси низких и средних классов по прочности.

Высокая стоимость СУБ обусловлена существенным расходом портландцемента, поэтому многие научные работы посвящены поиску методов сокращения расхода вяжущего без потери свойств СУБ. При проектировании СУБ важно ориентироваться на местные сырьевые компоненты в качестве крупных и мелких заполнителей, а также активные и инертные минеральные добавки с целью снижения удельной стоимости кубометра бетона. Для снижения стоимости компонентов СУБ целесообразно использовать минеральные добавки из отходов промышленности. Основными применяемыми активными минеральными добавками техногенного происхождения являются зола-унос ТЭС и молотый доменный гранулированный шлак [5].

Проблема утилизации отходов промышленности и их использования в качестве сырья для производства строительных материалов актуальна не только за рубежом, но и в нашей стране. Это в первую очередь связано с улучшением экологической ситуации и сокращением территории хранения отходов. В современном мире использование вторичных заполнителей в качестве замены природным стало частой практикой, поскольку это позволяет экономить природные ресурсы, сокращает потребление энергии и уменьшает количество отходов, отправляемых на полигоны [6, 7].

Доменный гранулированный шлак всегда рассматривался в качестве одной из наиболее перспективных минеральных добавок, способных заменить часть клинкера в цементе без значительного снижения его характеристик. За счет такой замены в различные периоды развития строительной индустрии решались задачи снижения дефицита цемента и себестоимости его производства, повышения стойкости к сульфатной коррозии и эффективности тепловой обработки бетона, снижения ресурсоемкости производства и выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу [8]. Введение шлака в состав СУБ может снижать его морозостойкость и прочность, особенно в раннем возрасте, но при этом шлак повышает коррозионную стойкость, а также улучшает другие характеристики бетона. Снижение ранней прочности бетона при частичной замене портландцемента молотым доменным шлаком может быть компенсировано щелочными активаторами твердения, например Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaOH.

Совместно с минеральными добавками неотъемлемым компонентом СУБ является высокоэффективный поликарбоксилатный суперпластификатор. Эффективные суперпластификаторы на основе модифицированных поликарбоксилатных эфиров снижают предельное напряжение сдвига смесей, существенно повышая их текучесть, в то время как тонкодисперсные минеральные добавки (и/или модификаторы вязкости) повышают вязкость растворной части для предотвращения расслоения бетонной смеси [9]. При этом разжижающая способность суперпластификаторов весьма чувствительна к особенностям химико-минералогического состава цемента, а также минеральных добавок, что в современном бетоноведении трактуется как совместимость добавок. Так, поликарбоксилатные суперпластификаторы, как правило, плохо совместимы с высокоалюминатными цементами, снижается их эффективность в присутствии повышенного содержания щелочей, при низкой температуре окружающей среды [10].

На основании анализа литературных источников установлено, что оптимальное сочетание эффективных суперпластификаторов и высокодисперсных кремнеземсодержащих материалов техногенного происхождения (микрокремнезема,

кварцевой муки, молотого доменного шлака) позволяет направленно управлять реологическими свойствами бетонных смесей, модифицировать структуру и свойства СУБ [1, 3].

Стоимость суперпластификаторов на основе поликарбоксилатных эфиров, а также микрокремнезема остается достаточно высокой. Это обуславливает необходимость поиска решений по разработке составов полифункциональных модификаторов, основу которых составляют различные отходы промышленности, чтобы обеспечить получение бетонных смесей и бетонов с нормируемыми показателями качества [5].

Для снижения стоимости СУБ в качестве заполнителей используют вторичный щебень из бетонного лома. Однако при этом возникает проблема повышения водопотребности бетонной смеси и, как следствие, снижения прочности бетона. Решение возможно за счет активации вторичного щебня, но это направление требует дальнейших исследований [7–10].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Целью данной научно-исследовательской работы является получение СУБ для изготовления малых архитектурных форм (МАФ) с маркой по удобоукладываемости РК1 без признаков расслоения, классов по прочности В25–В30; снижение себестоимости СУБ за счет применения вторичного щебня и отечественного суперпластификатора.

В качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Н; мелкого заполнителя – кварцевый песок с  $M_k = 2,1$ ; крупного заполнителя – вторичный щебень фракции 5–10 мм; минеральной добавки – тонкомолотый гранулированный доменный шлак с удельной поверхностью  $450 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; активатора твердения – натрий серноокислый безводный; суперпластификатора – Полипласт ПК «S» (15 % сухого вещества) на основе поликарбоксилатных эфиров.

Матрица планирования и физико-механические свойства СУБ  
на 7-е сутки твердения в нормальных условиях

№ п/п	Уровни факторов		Значения факторов, %		Полученные результаты		
	$X_1$	$X_2$	Молотый шлак	Полипласт ПК «S» (конц. 15 %)	В/Ц	Средняя плотность $\text{кг}/\text{м}^3$	Прочность на сжатие на 7-е сутки, МПа
1	–1	–1	20	1	0,57	2,20	28,5
2	+1	–1	30	1	0,67	2,19	26,5
3	–1	+1	20	2	0,49	2,25	35,3
4	+1	+1	30	2	0,57	2,23	29,7
5	0	0	25	1,5	0,56	2,21	29,5
6	+1	0	30	1,5	0,61	2,20	27,9
7	–1	0	20	1,5	0,62	2,21	33,4
8	0	+1	25	2	0,57	2,24	31,8
9	0	–1	25	1	0,62	2,20	27,6

Для изготовления образцов все сухие компоненты смеси дозировали согласно рецепту и перемешивали до получения однородной смеси. Затем добавляли воду до получения требуемой удобоукладываемости РК1. Далее бетонную смесь заливали в формы с размерами ячеек  $10 \times 10 \times 10$  см и ставили в камеру нормального твердения. Образцы испытывали через 7 суток.

По результатам планированного эксперимента получены математические модели зависимостей В/Ц, средней плотности, предела прочности на сжатие от содержания доменного шлака и суперпластификатора. Результаты представлены в таблице и на рис. 1–4.

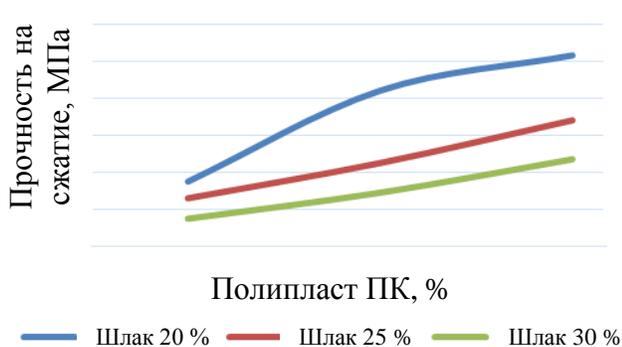


Рис. 1. Зависимость предела прочности на сжатие СУБ от содержания Полипласт ПК «S»

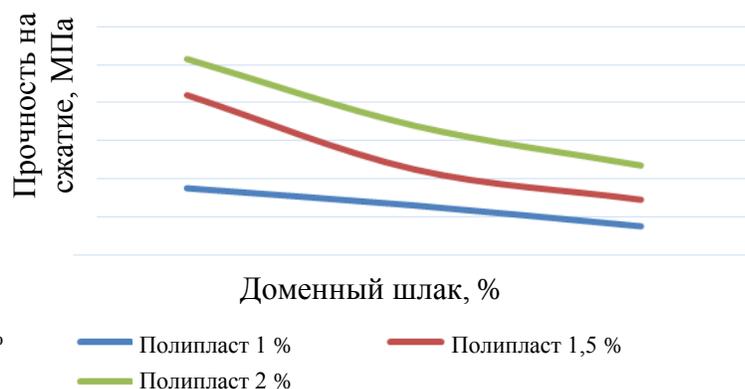


Рис. 2. Зависимость предела прочности на сжатие СУБ от содержания молотого шлака

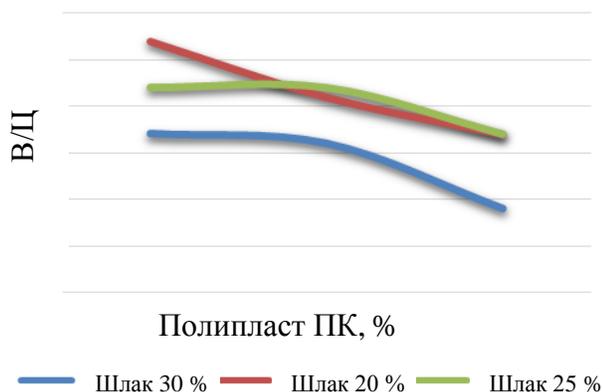


Рис. 3. Зависимость В/Ц СУБ от содержания Полипласт ПК «S»

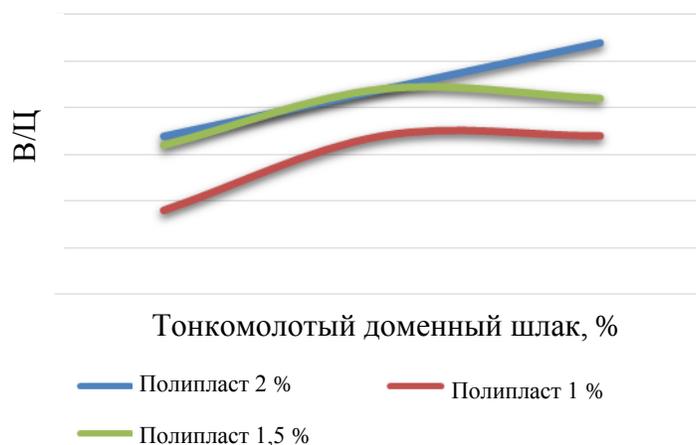


Рис. 4. Зависимость В/Ц СУБ от содержания молотого шлака

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Увеличение содержания Полипласт ПК «S» ведет к снижению В/Ц и увеличению прочности на сжатие в возрасте 7 суток. При варьировании Полипласт ПК «S» от 1 до 2 % и содержании шлака 20 % рост прочности составляет 27,8 %; содержании шлака 25 % рост прочности составляет 22,3 %, содержании шлака 30 % рост прочности составляет 10,8 %.

При увеличении процента содержания шлака в смеси рост прочности уменьшается. Оптимальное содержание Полипласт ПК «S» (с содержанием сухого вещества 15 %) составляет 1,5–2 % от массы цемента. Большой процент экономически неоправдан. Цена добавки в 2–2,5 раза ниже аналогов.

Молотый доменный шлак является наполнителем СУБ, регулирует гранулометрический состав зерновой части и реологические свойства смеси, снижает водоотделение смеси, повышает коррозионную стойкость, вводится вместо части цемента, что дает экономический эффект. Увеличение содержания молотого доменного шлака ведет к повышению В/Ц и уменьшению прочности на сжатие в возрасте 7 суток. Введение шлака менее 20 % экономически не целесообразно и не дает заметного снижения водоотделения. При варьировании шлака от 20 до 30 % прочность на сжатие уменьшается от 7 до 16 %. Компенсировать уменьшение прочности при введении шлака возможно увеличением дозировки Полипласт ПК «S».

При проектировании СУБ класса по прочности В25 считаем оптимальным следующий состав: 30 % шлака и 1,5 % Полипласт ПК «S», прочность на 7-е сутки составляет 27,9 МПа – 87,2 % от проектной. При проектировании СУБ класса по прочности В30 оптимален состав: 20 % шлака и 1,5 % Полипласт ПК «S», прочность на 7-е сутки составляет 33,4 МПа – 86,9 % от проектной.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработанные СУБ можно использовать для изготовления МАФ: цветочницы, урны, скамьи, вазоны, что является лучшим украшением парка, сада или территории, прилегающей к дому. При организации производства МАФ из-за небольших размеров, тонких стенок и сложной геометрической формы изделий применение традиционных бетонных смесей с крупным заполнителем затруднительно. В связи с этим в заводских условиях для изготовления МАФ целесообразно применять безвибрационную технологию из высокоподвижных самоуплотняющихся смесей, а в качестве минерального сырья использовать техногенные отходы (мелкий и крупный заполнители из дробленого бетона) для снижения себестоимости.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Иванова Т.А. Колесникова Л.Г. Оценка эффективности применения бетонного лома в качестве крупного заполнителя для бетона // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 3 (87). С. 444–454.
2. Шевченко В.А. Шатрова С. А. Исследование возможности получения заполнителя для бетонов из бетонного лома // *Эпоха науки*. 2017. № 9. С. 165–168.
3. Повышение эффективности бетонов с использованием рециклингового заполнителя / О.А. Ларсен [и др.] // *Техника и технология силикатов*. 2021. Т. 26. № 2. С. 46–52.
4. Разработка составов самоуплотняющегося бетона на основе бетонного лома с использованием структурных характеристик / В.В. Наруть [и др.] // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 4. С. 8–16.
5. Наруть В.В., Ларсен О.А. Оптимизация состава самоуплотняющегося бетона на основе бетонного лома промышленных зданий // *БСТ – Бюллетень строительной техники*. 2020. № 3 (1027). С. 56–59.
6. Физико-механические особенности материалов на основе бетонного лома Д.С. Денисевич [и др.] // *Вестник евразийской науки*. 2020. № 3. С. 4–6.

7. Повышение коррозионной стойкости бетонов путем применения активных заполнителей второго типа / Н.М. Тольпина [и др.] // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. № 2. С. 27–32.
8. Композиционные вяжущие на основе бетонного лома / Р.В. Лесовик [и др.] // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 7. С. 8–16.
9. Магсумов А.Н., Шарипьянов Н.М. Использование бетонного лома в качестве крупного заполнителя для производства бетонных смесей // *Символ науки*. 2018. № 6. С. 29–32.
10. Бедов А.И., Ткач Е.В., Пахратдинов А.А. Вопросы утилизации отходов бетонного лома для получения крупного заполнителя в производстве железобетонных изгибаемых элементов // *Вестник МГСУ*. 2016. № 5. С. 91–93.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*МИЦКЕВИЧ Анастасия Сергеевна* – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: anastasiamickevic85@gmail.com

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Мицкевич А.С., Курятников Ю.Ю. Самоуплотняющиеся бетоны на основе техногенных отходов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 4 (20). С. 17–23.

---

#### SELF-COMPACTING CONCRETE BASED ON MAN-MADE WASTE

*A.S. Mitskevich, Yu.Yu. Kuryatnikov*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article presents the results of the development of self-compacting concrete (SCB) for the manufacture of small architectural forms (SAF). It is noted that at the organisation of SAF production due to small sizes, thin walls and complex geometric shape of products it is difficult to use traditional concrete mixtures with coarse aggregate, therefore in factory conditions for SAF production it is expedient to use vibration-free technology of high-moving self-compacting mixtures, and as mineral raw materials to use technogenic wastes (fine and coarse aggregate from concrete scrap) to reduce the cost price.

**Keywords:** self-compacting concrete, concrete scrap, man-made waste, ground blast furnace slag, modifiers.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*MITSKEVICH Anastasia Sergeevna* – Master's Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: anastasiamickevic85@gmail.com

*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

Mitskevich A.S., Kuryatnikov Yu.Yu. Self-compacting concrete based on man-made waste // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 17–23.

УДК 69:006:004.9

### ВОПРОСЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*Ю.Н. Москвина*

*Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Москвина Ю.Н., 2023

**Аннотация.** Дан краткий обзор развития технологий 3D-печати, а также указаны основные направления технического регулирования и формирования нормативно-технического режима аддитивного строительного производства.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, строительство, национальный стандарт, стандартизация.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-23-27**

#### ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений инновационного развития строительной отрасли является внедрение аддитивных технологий (АТ).

Активно технологии 3D-печати начали развиваться в 1980-х годах, когда для производства деталей стали применяться методы, основанные на послойном выращивании изделия по модели системы автоматизированного проектирования, в том числе так называемые методы аддитивного производства (Additive Manufacturing, АП) [1].

К началу 90-х годов XX века появился термин «3D-печать». Если раньше изделие «выращивалось» из жидкого акрила, то к тому времени оно уже изготавливалось из порошка под воздействием лазера [2]. Данный период ознаменовался активным ростом индустрии 3D-печати, основанием новых компаний и изучением новых технологий АП.

В дальнейшем технологии 3D-печати развивались по двум основным направлениям. С одной стороны, это высокотехнологичные исследования, в рамках которых создавались дорогостоящие системы 3D-принтеров, предназначенные для производства сложных деталей, а с другой – это развитие повседневного функционала 3D-принтеров, которое сделало их доступными для широкого применения [3].

Первые строительные проекты с использованием 3D-печати появились в 2014 году, а к 2023 году в мире уже было «напечатано» около тысячи объектов (от отдельных зданий

до целых поселков и крупных внедрений в области инфраструктуры). В ряде стран к настоящему моменту создана или активно создается нормативная база для применения АТ в строительной отрасли [4].

В декабре 2016 года в Подмоскowie был осуществлен совместный проект американского стартапа Apis Cor и российских компаний. С помощью 3D-принтера был напечатан жилой дом площадью 38 м<sup>2</sup>. Возведение самонесущих стен, перегородок и ограждающих конструкций здания заняло 24 часа [5].

В настоящее время Россия занимает 11-е место в мире по производству оборудования и внедрению технологий 3D-печати. Согласно оценкам специалистов, общий объем мирового рынка АП в 2020 году составил около 16 млрд долларов, в 2022 году – 25,5 млрд, а к 2024 году ожидается значительный рост рынка АТ. Российский сегмент также показывает положительную динамику, но существенно отстает от мировых показателей [6].

В июле 2021 года была утверждена Стратегия развития АТ на период до 2030 года. К этому времени планируется разработать и промышленно освоить ключевые АТ, создать серийное производство оборудования и материалов, расширить научно-исследовательскую деятельность, разработать национальные стандарты в области АТ и профессиональные и образовательные программы [7].

В целях обеспечения требований Федеральных законов «О техническом регулировании» от 27.12.2002 № 184-ФЗ и «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ одним из важных направлений развития АП является его стандартизация.

Центром разработки технических стандартов в области 3D-печати за рубежом является организация ASTM (American Society for Testing and Materials), технический комитет F42 которой включает около 600 экспертов из 25 стран [8].

Решением вопросов стандартизации АТ в России занимается Технический комитет 182 «Аддитивные технологии» (ТК), созданный в 2015 году при Росстандарте. В комитет входит более 60 организаций, представляющих научное сообщество, производителей оборудования и материалов. В настоящее время в России действует 51 стандарт в области АТ. В ближайшее время ТК планирует разработать и актуализировать еще более 50 стандартов [9].

Правовые основы стандартизации в Российской Федерации, вопросы разработки, утверждения, изменения, актуализации, отмены и применения документов по стандартизации регулируются Федеральным законом № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Для ускорения внедрения результатов научно-исследовательской деятельности Росстандарт определил правила разработки и утверждения предварительных национальных стандартов (ПНСТ), в которых устанавливаются общие характеристики объекта стандартизации, а также правила и принципы в отношении объекта стандартизации на ограниченный срок в целях накопления опыта в процессе применения предварительного национального стандарта для возможной последующей разработки на его основе национального стандарта.

В ПНСТ 495-2020 «Аддитивные технологии. Применение трехмерной печати (3D-печать) в строительстве» представлен обзор существующих АТ, даны термины и определения, общие требования по применению АТ в строительстве.

Современные стандарты устанавливают требования к материалам для аддитивной печати и ее продукции, методам контроля изделия, квалификации персонала, общие

требования к оборудованию для 3D-печати, регулируют автоматизацию производственных процессов и процесс создания цифровых моделей.

В области аддитивного строительного производства действуют следующие национальные стандарты: ГОСТ Р 59095-2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Термины и определения», ГОСТ Р 59097-2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Технические требования», ГОСТ Р 59096-2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Методы испытаний».

В декабре 2021 года Правительство РФ утвердило план мероприятий по использованию технологий информационного моделирования в строительстве. Он включает подготовку предложений по разработке и стандартизации подходов к проектированию, расчету и информационному моделированию объектов, возводимых с использованием технологий аддитивного строительного производства, а также выявление и обоснование выбора зданий, сооружений и изделий строительного назначения, для которых наиболее целесообразно применение технологий аддитивного строительного производства.

В ноябре 2022 года Приказом Росстандарта была утверждена Программа национальной стандартизации на 2023 год (ПНС-2023). Важными направлениями разработки стандартов в этот период являются АТ в строительстве; информационные, цифровые технологии; строительные конструкции, изделия и материалы.

В 2019 году Министерство промышленности и торговли РФ сформировало каталог отечественной продукции в области АП, а в сентябре 2023 года (в рамках реализации Стратегии развития аддитивных технологий Минпромторгом России совместно с Росстандартом) была утверждена Перспективная Программа стандартизации в целях развития отрасли АТ в Российской Федерации на 2023–2030 годы.

При реализации указанной Программы будут решаться задачи улучшения технических характеристик и безопасности аддитивного оборудования, повышения качества и конкурентоспособности продукции АП; гармонизации требований документов национальной системы стандартизации с международными стандартами; разработки и совершенствования документов по стандартизации.

Программа разработана по 7 основным направлениям и содержит 57 стандартов, определяющих общие принципы применения АТ, оборудование, сырье, квалификацию персонала и получаемые изделия [10].

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Введенные в действие национальные стандарты описывают базовые принципы аддитивных технологических процессов, но не являются достаточными для решения вопросов по развитию и продвижению АТ, в том числе в строительстве. Ускорение технологического развития, расширение области применения АТ, создание условий для внедрения технологий аддитивного строительного производства возможно только при наличии документов по стандартизации, разработка которых является сегодня одной из первоочередных задач. Гармонизация национальных стандартов с международными документами позволит обеспечить устойчивое развитие, конкурентоспособность отечественного АП и промышленный суверенитет.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Смуrow Ю.И. Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом // Инновации. 2013. № 10. С. 76–82.

2. 3D-печать: история, применение. URL: <http://rcm2.ru/razvlechenie/3d-pechat-istoriya-primenenie-perspektivy/> (дата обращения: 20.09.2023).
3. Краткая история 3D-печати. URL: <https://www.3dpulse.ru/news/interesnoe-o-3d/kratkaya-istoriya-3dpechati/> (дата обращения: 20.09.2023).
4. Фиговский О.Л. Новации в строительстве. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=10486> (дата обращения: 10.10.2023).
5. Бойко А. Строительные принтеры. URL: <https://robotrends.ru/robopedia/stroitelnye-printery> (дата обращения: 12.10.2023).
6. Пояснительная записка к Перспективной программе стандартизации в целях развития отрасли аддитивных технологий в Российской Федерации на 2023–2030 годы. URL: [https://minpromtorg.gov.ru/docs/other\\_documents/?pdfModalID=16d05c52-6c74-4f42-b0ed-9fb825716d4c&fileModalID=c2165a4e-7802-42b0-b200-f579413f14b2](https://minpromtorg.gov.ru/docs/other_documents/?pdfModalID=16d05c52-6c74-4f42-b0ed-9fb825716d4c&fileModalID=c2165a4e-7802-42b0-b200-f579413f14b2) (дата обращения: 10.10.2023).
7. Стратегия развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 14.07.2021 № 1913-с. URL: <http://government.ru/docs/all/135700/> (дата обращения: 20.04.2023).
8. Стандартизация аддитивных технологий. URL: <https://cssi.innovations-khv.ru/news/novosti-tsssi/standartizatsiia-additivnyh-tehnologii> (дата обращения: 15.07.2023).
9. Утверждены национальные стандарты в области аддитивных технологий 3D-печати // Аддитивные технологии. URL: <https://additiv-tech.ru/news/utverzhdenny-nacionalnye-standardy-v-oblasti-additivnyh-tehnologiy-3d-pechati.html> (дата обращения: 23.10.2023).
10. Утверждена Перспективная Программа стандартизации. URL: [https://minpromtorg.gov.ru/press-centre/news/utverzhdena\\_perspektivnaya\\_programma\\_standartizatsii](https://minpromtorg.gov.ru/press-centre/news/utverzhdena_perspektivnaya_programma_standartizatsii) (дата обращения: 23.10.2023).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

*МОСКВИНА Юлия Николаевна* – кандидат философских наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: [julim@yandex.ru](mailto:julim@yandex.ru)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Москвина Ю.Н. Вопросы стандартизации аддитивных технологий в строительстве // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 4 (20). С. 23–27.

---

## STANDARDIZATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION

*Yu.N. Moskvina*

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article gives a brief overview of the development of 3D printing technologies, the main directions of technical regulation and the formation of the regulatory and technical regime of additive construction production.

**Keywords:** additive technologies, construction, national standard, standardization.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

*MOSKVINA Yulia Nikolaevna* – Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: julim@yandex.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Moskvina Yu.N. Standardization of additive technologies in construction // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 23–27.

УДК 624.131.5

**ЭФФЕКТИВНЫЕ ДОРОЖНЫЕ И АЭРОДРОМНЫЕ ПОКРЫТИЯ  
ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА НА СЕВЕРЕ**

*В.И. Трофимов*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Трофимов В.И., 2023

**Аннотация.** Затронута актуальная проблема повышения эффективности работы дорожных и аэродромных цементобетонных покрытий в Арктической зоне. Отмечено, что необходимо учитывать суровые природно-климатические условия строительства, вечномерзлое состояние грунтов и высокую стоимость работ. Рассмотрены вопросы совершенствования технологии и конструкции дорожных и аэродромных плит. Предложено для изготовления дорожных плит с повышенной эксплуатационной надежностью использовать технологию многослойных плит с применением композитных материалов и изделий на полимерной основе. Обосновано исполнение дорожной плиты сборной – двухслойной или трехслойной, где нижний и верхний слои выполняются из готовой полимерной композитной плиты. Получены положительные результаты комплексных испытаний на моделях.

**Ключевые слова:** арктические зоны, трещиностойкость, полимерная композитная плита, арматура, сборная дорожная плита.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-27-33**

Эффективное обустройство северных территорий напрямую связано с решением вопроса ускоренного строительства широкой сети дорог и аэродромов. При этом интенсивное освоение уникальных и стратегически важных для нашей страны месторождений, расположенных в удаленных районах Арктики, включая шельф, а также надежная их защита невозможны без применения новых технологических и конструктивных решений при строительстве транспортных сооружений.

Одним из сдерживающих факторов, негативно влияющих на эффективность строительства дорог (аэродромов), является преждевременное разрушение дорожного

(аэродромного) бетонного полотна, которое наиболее широко выполняется из готовых железобетонных плит [1].

### Проблема

Нижний бетонный слой дорожной (аэродромной) плиты из-за действия переменного изгибающего момента и воздействия агрессивной среды со стороны основания подвержен трещинообразованию. Верхний слой, включая торцы, за счет действия различных повышенных нагрузок, в том числе и динамических, и атмосферного воздействия (с учетом действия переменного температурного фактора) также подвержен разрушению. Становится очевидно, что необходимо либо защищать верхний и нижний слои дорожной плиты физико-химическими способами, либо совершенствовать ее конструкцию. При этом следует снижать массу плиты с учетом ее транспортирования и работы на грунтовом основании в суровых природно-климатических условиях Севера.

Одним из путей решения проблемы повышения эффективности строительства дорог и аэродромов на высокольдистых тонкодисперсных грунтах в Арктической зоне является комплексный подход, заключающийся в совершенствовании конструкции покрытия дорог (аэродромов) из дорожных (аэродромных) плит, технологии их изготовления и возможности эксплуатации в суровых и агрессивных условиях. При этом плиты должны отличаться многофункциональностью и повышенной эффективностью.

Разработан комплекс оригинальных технических решений по изготовлению более эффективных дорожных (аэродромных) плит с обеспечением надежной коррозионной защиты, повышенной трещиностойкости, облегченных и со сниженным объемом ремонтных работ.

Принципиально новым является то, что дорожная (аэродромная) плита (независимо от условий ее работы) может изготавливаться в стандартных формах, где применяется новый способ формования плиты. Она выполняется сборной с применением готовых защитно-несущих элементов – полимеркомпозитных плит, обладающих хорошими физико-механическими и эксплуатационными свойствами (рис. 1), а также с использованием новых оригинальных и технологичных способов их соединения с бетонным слоем. В целом это очень важно учитывать при работе в суровых природно-климатических условиях арктических зон.



а

б

в

Рис. 1. Пример устройства быстровозводимого временного дорожного полотна из композитных замковых плит МДП ООО «Русполимер Групп»: использование в зимних условиях (а); временное дорожное полотно (б); временная вертолетная площадка (в)

Более высокие показатели по прочности, трещиностойкости и сопротивляемости динамическим нагрузкам объясняются тем, что у полимеркомпозитного материала деформационные свойства лучше, чем у бетона. Появление трещин в бетоне не является только следствием коррозии. При испытании материала на растяжение деформация в предельном состоянии для стеклопластика составляет до 2,8 %, а для металла – 25 %. При этом в СП52-101-2003 указано, что армированные бетонные конструкции дают трещины уже при деформации растяжения 0,015 %, т.е. задолго до достижения предела прочности арматуры, независимо от ее материала (композита или стали) [2].

Для этого предлагается использовать готовую полимеркомпозитную плиту в качестве защитного слоя бетона, а также использовать оригинальные более простые – более технологичные способы соединения полимеркомпозитных плит с бетонным слоем [3, 4].

Соединение бетонного слоя с полимеркомпозитной плитой предлагается осуществлять простыми оригинальными способами, например через анкеры-бобышки, которые образуются при заполнении бетонной смесью отверстий, заранее засверленных в готовой полимеркомпозитной плите (рис. 2) (патент № 201315).

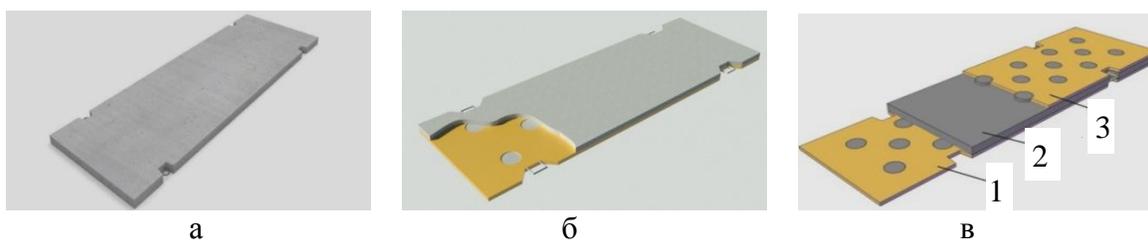


Рис. 2. Дорожные плиты: стандартная (а); двухслойная (б); трехслойная (в): 1 – нижняя полимеркомпозитная плита; 2 – бетонный армированный слой; 3 – верхняя полимеркомпозитная плита

Важными при изготовлении плит являются вопросы технологичности и надежности соединения их слоев. Например, в источнике [5] обосновывается применение в строительстве двухслойной дорожной плиты, где имеется верхний полимеркомпозитный слой, который предлагается отдельно формовать в виде плиты с укладкой специальных анкеров для соединения с бетонным слоем. Такая технология существенно увеличивает трудоемкость изготовления дорожной двухслойной сборной плиты, что резко снижает эффективность ее использования.

Для более надежного соединения слоев, а также упрощения технологии изготовления сборной дорожной плиты могут быть использованы анкеры в виде саморезов (рис. 3) (патент № 2739818) [6].

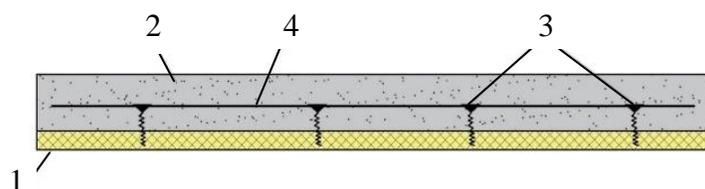


Рис. 3. Конструктивная схема сборной двухслойной дорожной плиты с креплением полимеркомпозитной плиты анкерами-саморезами: 1 – нижняя полимеркомпозитная плита; 2 – фибробетонный слой; 3 – анкеры-саморезы; 4 – полимеркомпозитная сетка

Сборная трехслойная дорожная плита содержит верхний слой из готовой полимеркомпозитной плиты 1 с анкерами-саморезами 3 и нижний из готовой полимеркомпозитной георешетки 2, соединенные с внутренним фибробетонным слоем 4 выпусками анкеров 3 и ячейками 6 георешетки 2, которые заполнены фибробетоном, армированным геосеткой 5 (рис. 4) (патент № 200921).

Разработанная сборная дорожная плита выполнена комбинированной и может работать более эффективно, чем стандартная монолитная плита, так как вся конструкция обеспечивает возможность восприятия более высоких нагрузок, включая динамические. При этом повышается технологичность выполнения основных операций по изготовлению дорожной плиты, снижается масса плиты.

Для развития разработанных новых конструктивных решений сборных плит предложено их изготавливать с натянутой полимеркомпозитной сеткой. Здесь используется оригинальное решение – фиксировать сетку и натягивать на шляпках анкеров-саморезов (рис. 5) (патент № 2760668).

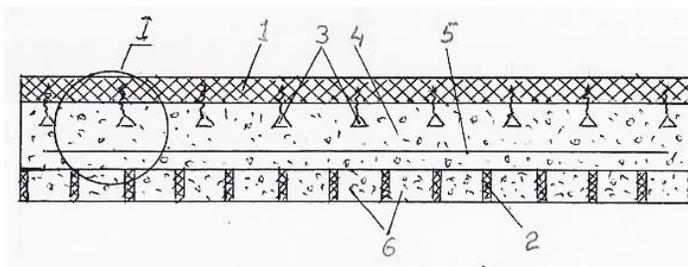


Рис. 4. Сборная трехслойная плита

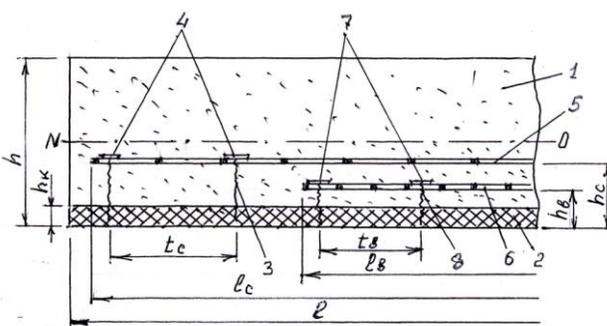


Рис. 5. Конструктивная схема сборной дорожной плиты с нижним слоем из полимеркомпозитной плиты и двумя натянутыми полимеркомпозитными сетками:  
1 – фибробетонный слой;  
2 – полимеркомпозитная плита;  
3, 8 – анкеры-саморезы;  
4, 7 – шляпки анкеров-саморезов;  
5 – полимерная композитная сетка (верхняя); 6 – вспомогательная полимеркомпозитная сетка

Эффективность работы сборной плиты повышается также благодаря использованию новой полимеркомпозитной фибры повышенного сцепления.

Многофункциональность сборной плиты обеспечивается за счет возможности ее целенаправленного конструктивного изменения в ходе изготовления в условиях цеха путем подбора соответствующих защитных полимеркомпозитных плит, композитной арматуры и композитной фибры с учетом конкретного использования:

- при обустройстве строительных, нефтегазовых и вертолетных площадок;
- устройстве мостовых переходов;

возведении железнодорожных платформ (двухслойная плита с верхним полимеркомпозитным слоем);

в дорожном строительстве (двухслойная плита с нижним полимеркомпозитным слоем);

аэродромном строительстве (трехслойная плита с верхним и нижним полимеркомпозитными слоями).

Оригинальный комплекс технических решений обеспечивает повышенную эффективность использования сборной плиты, которая достигается на стадии:

1) изготовления за счет:

высокотехнологичности, позволяющей при формовании плиты использовать стандартные формы и применять более простую технологию – технологию сборных плит, включающую использование готовых полимеркомпозитных плит-полуфабрикатов с возможностью их надежного и простого оригинального соединения с бетонным слоем через образованные или установленные особым образом анкеры (анкеры-бобышки, анкеры-саморезы и др.);

применения простого и более технологичного способа соединения слоев сборной плиты анкерами в виде саморезов, бобышек и др.;

снижения объема компонентов, используемых для приготовления смеси на одну плиту, при замещении части бетонного слоя полимеркомпозитной плитой (одной или двух), использования менее мощного формовочного оборудования, снижения стоимости плиты;

возможности полного отказа от стальной арматуры при использовании в сборной плите полимеркомпозитных изделий, а именно верхнего и нижнего слоев в виде готовых плит, арматуры, сеток (каркасов), фибры;

2) строительства за счет:

снижения массы плиты, позволяющей использовать крановое оборудование меньшей грузоподъемности (мощности);

использования автотранспорта меньшей грузоподъемности или возможности перевозки большего количества плит за одну поездку;

3) эксплуатации за счет:

снижения давления на грунтовое основание путем снижения массы плиты на 25–30 %, что повышает ее несущую способность;

обеспечения повышенной коррозионной стойкости благодаря исключению или снижению прямого контакта бетона с грунтовым основанием;

повышенной трещиностойкости бетонного слоя с предотвращением отслаивания и торцовых сколов при установке верхней полимеркомпозитной плиты;

повышенной прочности при исполнении бетонного слоя дисперсноармированным с использованием полимеркомпозитной фибры повышенного сцепления (патенты № 2490406, 2582254, 2601705);

меньшей степени обледенения при установке верхней полимеркомпозитной плиты;

повышенной надежности работы сборных плит и лучших экономических показателей.

#### **Экономическая эффективность**

Одним из способов достижения экономической эффективности является отказ от изготовления и эксплуатации преднапряженных дорожных плит и переход на использование новых ненапряженных сборных плит с восприятием тех же нагрузок. Это

позволит получить существенный экономический эффект за счет снижения затрат на их изготовление.

Можно приближенно оценить экономическую эффективность предложенной разработки. Если стоимость изготовления типовой преднапряженной дорожной (аэродромной) плиты длиной 6 м составляет 15 тыс. рублей, а стоимость изготовления преднапряженной плиты на 20 % меньше, то экономия только от использования одной новой преднапряженной сборной плиты – 3 тыс. рублей. В этом случае при строительстве, например, двухполосной дороги с укладкой четырех плит экономия на 1 км может составить 2 млн рублей.

В настоящее время другим реальным способом достижения экономической эффективности использования новых сборных дорожных плит является возможность полного отказа от применения стальной арматуры. Например, в случае замены в дорожной плите ПАГ-18 ( $6\ 000 \times 2\ 000 \times 180$ , вес 5 100 кг, ГОСТ 25912) только нижнего бетонного слоя полимеркомпозитной плитой толщиной 50 мм можно получить экономию бетона примерно на 30%! При этом необходимо учесть, что стоимость самих полимеркомпозитных материалов (сетки, арматуры и др.) для изготовления новой сборной плиты будет также меньше.

Кроме вышеназванного, с учетом того, что масса сборной плиты снижается на 25–30 % (двухслойная или трехслойная), возможно перевозить за один раз на 1–2 плиты больше тем же транспортным средством, что существенно повышает экономическую эффективность использования новой сборной плиты для транспортного строительства, особенно в условиях арктических зон. В то же время на экономическую эффективность положительно влияет то, что новые сборные плиты меньше подвержены разрушению в процессе эксплуатации и они более долговечны.

Проведенные модельные испытания новой конструкции сборной дорожной плиты, в частности двухслойной, позволяют сделать вывод, что ее исполнение с нижним слоем из готовой полимеркомпозитной плиты, а также применение композитной арматуры и новой полимеркомпозитной фибры повышенного сцепления даст возможность в будущем полностью отказаться от стальной арматуры, что улучшит физико-механические свойства дорожной бетонной плиты, значительно снизит ее массу и стоимость изготовления.

Предлагаемый комплекс технических решений актуален, так как сборные облегченные двухслойные и трехслойные плиты повышенной трещиностойкости могут найти широкое применение при строительстве дорог и аэродромов в сложных природно-климатических условиях арктических зон, особенно на тяжелонагруженных участках дорог с интенсивным движением, при обустройстве нефтегазовых месторождений, а также при организации строительных площадок и выполнении ремонтных работ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимов В.И. Повышение эффективности транспортного строительства в Арктических зонах // *Научный Вестник Арктики*. 2018. № 3. С. 31–39.
2. ПАО «Редуктор». URL: <https://izh-reduktor.ru/about/art/article/mify-o-kompozitnoj-armature.html> (дата обращения: 17.07.2023).
3. Патент РФ 201315. *Дорожная плита* / Трофимов В.И., Егоров А.Р., Васючков К.А.; Заявл. 14.07.20; Оpubл. 09.12.2020. Бюл. № 34. 7 с.
4. Патент РФ 2739818 С1. *Дорожная плита* / Трофимов В.И.; Заявл. 25.06.2020; Оpubл. 28.12.2020. Бюл. № 1. 9 с.

5. Патент РФ 2667396. *Способ устройства дорожного покрытия повышенной долговечности* / Сушенцев Б.Н.; Заявл. 22.11.2017; Опубл. 19.09.2018. Бюл. № 26. 16 с.
6. Трофимов В.И., Цыбина Р.З., Хитрич Г.А. Оценка несущей способности анкеров сборной дорожной плиты с нижним композитным слоем на полимерной основе // *Саморазвивающаяся среда технического вуза: научные исследования и экспериментальные разработки: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции*. Тверь: ТвГТУ. 2022. С. 53–57.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Трофимов В.И. Эффективные дорожные и аэродромные покрытия для строительства на Севере // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 4 (20). С. 27–33.

---

### EFFICIENT ROAD AND AIRPORT PAVEMENTS FOR CONSTRUCTION IN THE NORTH

*V.I. Trofimov*

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article concerns the current problem of increasing the efficiency of road and airfield cement concrete pavements in the Arctic zone. To do this, it is necessary to take into account the harsh natural and climatic conditions of construction, the permafrost condition of the soil and the high cost of work. The article discusses issues of improving the technology and design of road and airfield slabs. It is proposed to use multilayer slab technology using composite materials and polymer-based products to produce road slabs with increased operational reliability. The design of the prefabricated road slab is justified - two-layer or three-layer, where the lower and upper layers are made of a ready-made polymer composite slab. Positive results of complex tests on models were obtained.

**Keywords:** arctic zones, crack resistance, polymer composite slab, reinforcement, prefabricated road slab.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*TROFIMOV Valery Ivanovich* – Candidate of Technical Sciences, 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. Efficient road and airport pavements for construction in the North // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 27–33.

УДК 666.972.162

**МОДИФИЦИРОВАННЫЙ БЕТОН  
ДЛЯ ГИДРОМЕЛИОРАТИВНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА***Ю.С. Филимонова, Е.В. Ткач, Т.В. Сусанина**Московский государственный строительный университет (г. Москва)*© Филимонова Ю.С., Ткач Е.В.,  
Сусанина Т.В., 2023

**Аннотация.** В рамках исследований рассмотрены вопросы, связанные с модификацией состава тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором и его влиянием на формирование структуры и свойства цементного камня, а также затвердевшего бетона. Обоснована возможность получения эффективного тяжелого бетона для гидромелиоративного строительства с улучшенными показателями эксплуатационных свойств по прочности и гидрофизическим характеристикам. Исследовано влияние трехуровневого дисперсного состава клинкерного компонента цементных частиц на снижение межчастичной пустотности и повышение прочности цементного камня. Отмечено, что полученные эксплуатационные показатели дают возможность рекомендовать модифицированный бетон для производства строительных изделий и конструкций, работающих в суровых условиях эксплуатации, в частности для лотков оросительных систем. Указано, что перспективы дальнейшей разработки научных исследований заключаются в совершенствовании состава модифицированного тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором путем поиска новых видов модификаторов и микроармирующих наполнителей для снижения себестоимости продукции и исследования возможностей его применения в гидротехнических сооружениях зоны переменного уровня воды.

**Ключевые слова:** модифицированный бетон, дисперсный состав клинкерного компонента, комплексный модификатор, долговечность.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-34-44****ВВЕДЕНИЕ**

К бетонам, применяемым в гидромелиоративном строительстве, предъявляются высокие требования по долговечности, которая оценивается в первую очередь их прочностью и водонепроницаемостью [1]. Основным направлением решения задач данного типа является создание высокой плотности структуры бетона, рационально сочетающего необходимые технологические и эксплуатационные характеристики, путем использования вяжущих веществ высокого качества и комплексных модификаторов [2, 3]. В частности, для этого требуется применение полидисперсных минеральных компонентов, обеспечивающих высокую плотность упаковки исходных частиц в каждом микрообъеме материала, а также пластификаторов и полимерных модификаторов, модифицирующих структуру и свойства материала [4, 5].

Перспективным является направление разработки и реализации эффективных мер по усилению и защите железобетона материалами с повышенной степенью сопро-

тивляемости агрессивным факторам окружающей среды, например полимерными композициями [6–8]. Полимербетоны еще не нашли широкого распространения из-за их дефицитности и высокой стоимости. Основным строительным материалом при возведении мелиоративных сооружений остаются бетон и железобетон.

Таким образом, решение задач получения бетонов, в частности для гидро-мелиоративного строительства, с высокими эксплуатационными свойствами путем модифицирования их структуры и свойств комплексными добавками [9–12] с каждым годом становится все более актуальным.

### ***МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ***

Свойства и структура модифицированного бетона изучались с использованием следующих материалов. В качестве вяжущего применяли портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н, производитель ООО «Холсим (Рус) Строительные Материалы» (ГОСТ 31108-2016); мелкого заполнителя – природный песок с модулем крупности 2,5 (поставщик ОАО «Хромцовский Карьер»; ГОСТ 8736-2014); крупного заполнителя – гранитный щебень. Для регулирования свойств бетонной смеси и полученного на его основе бетона вводили комплексную химическую добавку: суперпластификатор Melflux 5581 F на основе эфира поликарбоксилата (ООО «НПО СИНТЕЗ»; ГОСТ 24211-2008) и водорастворимой полимерной добавки «Полидон-А» (ООО «Орг-полимерсинтез»; ТУ 9365-002-46270704-2001) и дисперсно-армирующую добавку – рубленое базальтовое волокно (ООО «ИнРес»; ТУ 5952-002-13307094-08). Был проведен подбор предварительного состава тяжелой бетонной смеси с целью определения оптимального расхода исходных материалов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси, при котором выдерживаются заданные физико-механические, гидрофизические характеристики и эксплуатационные свойства проектируемого бетона. Работа выполнена с применением системно-структурного подхода на основе методологии строительного материаловедения в системе «состав – структура – свойства». Высокая степень достоверности обеспечивается проведением экспериментальных работ с использованием исследовательского и испытательного оборудования с достаточной воспроизводимостью результатов исследований; обоснованным использованием комплекса современных методов исследования: лазерной granulометрии, рентгенофазового, электронно-микроскопического и химического анализов; применением стандартных методик, обеспечивающих достаточную точность полученных результатов с вероятностью 0,95; использованием математических и статистических методов обработки данных.

### ***РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ***

В работе исследовалась упорядоченная структура разнодисперсного вяжущего, образующаяся за счет выбора оптимальной дисперсности. Было предусмотрено определение различных фракций клинкерного компонента, обеспечивающих максимальную плотность упаковки используемых цементных частиц. Исследование проводилось с тремя фракциями: (грубая – средний диаметр частиц  $d_{cp} = 12$  мкм с удельной поверхностью  $S_{уд} = 150$  м<sup>2</sup>/кг; средняя –  $d_{cp} = 6,6$  мкм,  $S_{уд} = 300$  м<sup>2</sup>/кг; тонкодисперсная –  $d_{cp} = 4,9$  мкм,  $S_{уд} = 450$  м<sup>2</sup>/кг).

В целях получения оптимального состава полидисперсного вяжущего (ПВ) исследовались топологические (геометрия) характеристики получаемых цементных композиций с применением программно-расчетного комплекса, основанного на использовании алгоритма Drop and Roll.

Анализ научных литературных источников показал, что для уменьшения влияния «пристенного эффекта» отношение диаметра частицы к размеру упаковки должно быть больше 20. В связи с тем, что расчет упаковки в 20 диаметров наибольшей сферы займет очень продолжительное время, было принято решение изучать единичную ячейку с отношением большего диаметра сферы к стороне 1:14. В нашем случае наибольший диаметр равен 12, следовательно, размер ячейки будет  $168 \times 168 \times 168$ . Исходные данные для расчета топологических характеристик и графическое изображение изменения плотности упаковки вяжущего представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета топологических характеристик

№	Дисперсные составы цементных частиц						Прочность цементного камня на сжатие		Плотность упаковки
							МПа, в возрасте, сут		
	Удельная поверхность фракции, $\text{м}^2/\text{кг}$		Состав, %		7	28			
1	ЦЕМ 42,5 Н контр.						28,4	43,5	0,542 214
2	150	0	0	100	0	0	20,3	25,2	0,563 098
3	0	300	0	0	100	0	26,2	39,4	0,545 223
4	0	0	450	0	0	100	38,6	49,7	0,539 342
5	150	300	0	20	80	0	24,1	39,6	0,578 784
6	150	300	0	25	75	0	20,7	31,3	0,580 167
7	150	300	0	30	70	0	19,0	28,6	0,583 709
8	0	300	450	0	80	20	41,2	58,5	0,569 484
9	0	300	450	0	75	25	47,4	60,7	0,570 658
10	0	300	450	0	70	30	50,6	63,2	0,572 362
11	150	300	450	15	80	5	40,2	52,0	0,587 762
12	150	300	450	15	75	10	44,6	56,4	0,590 834
13	150	300	450	15	70	15	48,5	57,8	0,592 656

Анализ данных (рис. 1) показал снижение плотности упаковки в предлагаемом составе на 0,5 % (рис. 1а, точка А) в сравнении с максимальным расчетным значением (рис. 1б, точка Б). Учитывая факт повышения энергозатрат при получении цементных частиц фракции  $450 \text{ м}^2/\text{кг}$ , было принято решение взять за оптимальную упаковку состав 12 (см. табл. 1) с соотношением цементных частиц в %: 15 – со средним диаметром  $d_{\text{ср}} = 12 \text{ мкм}$  и удельной поверхностью  $S_{\text{уд}} = 150 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; 75 –  $d_{\text{ср}} = 6,6 \text{ мкм}$ ,  $S_{\text{уд}} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; 10 –  $d_{\text{ср}} = 4,9 \text{ мкм}$ ,  $S_{\text{уд}} = 450 \text{ м}^2/\text{кг}$  (график на рис 1а, точка А).

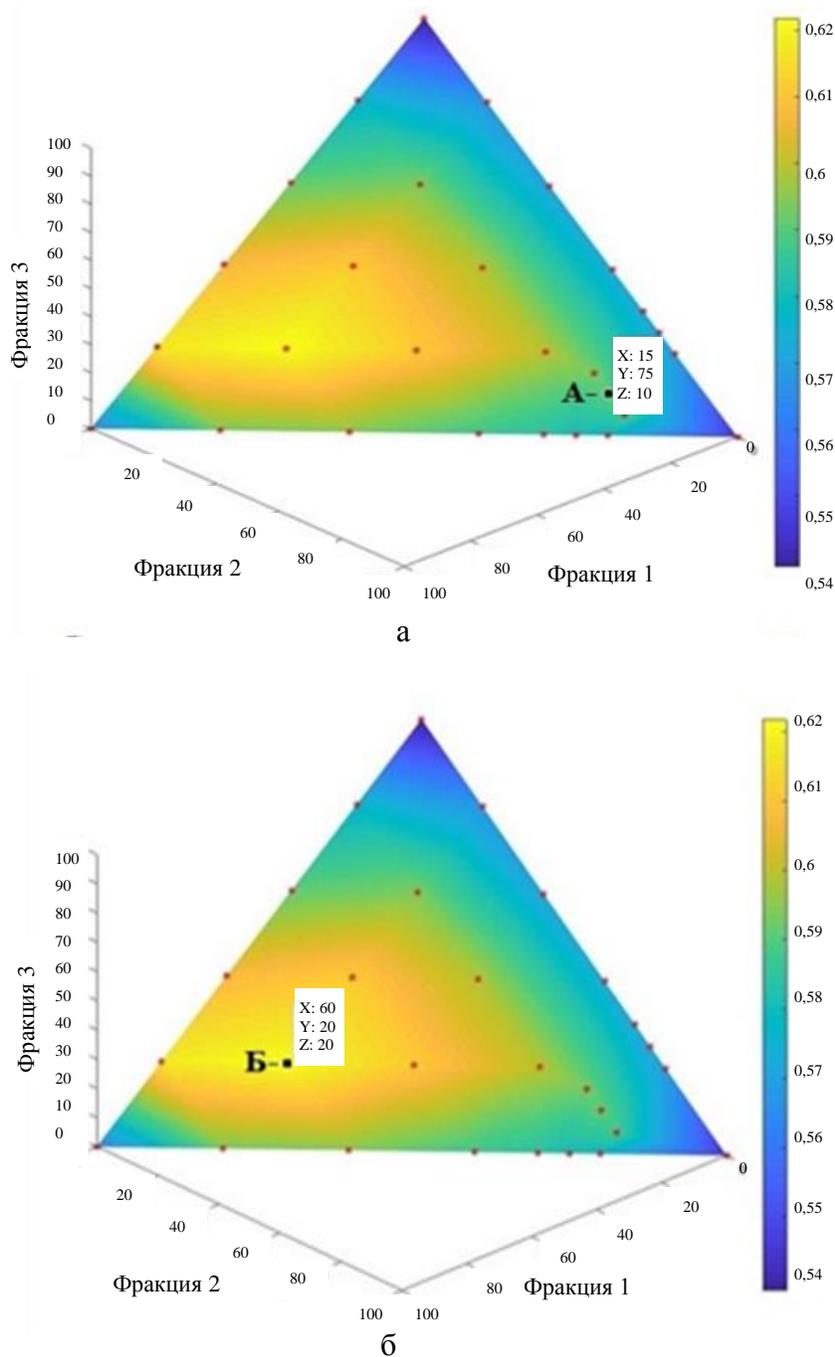
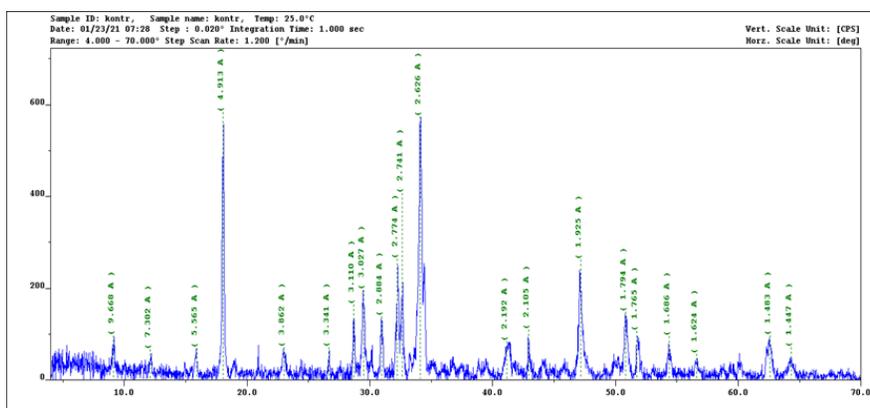


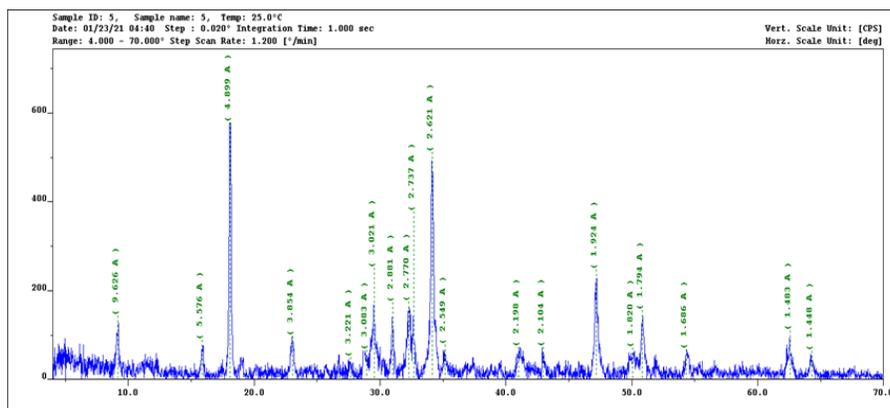
Рис. 1. Изменение плотности упаковки вяжущего в зависимости от состава композиции фракций цементных частиц различной дисперсности: максимальное расчетное значение упаковки в точке А (а); фактическое значение упаковки в точке Б (б)

Отмечалась положительная динамика зависимости прочности от плотности упаковки цементных частиц; оптимальный состав 12 показал прирост прочности в возрасте 7 и 28 суток на 57 и 29 % в сравнении с контрольным составом 1, что составляет 44,6 и 56,4 МПа соответственно.

Фазовый состав образцов цементного камня, рассчитанный на основе полученных данных рентгенофазового анализа (РФА), представлен на рис. 2 и в табл. 2. Результаты РФА показали, что в составе 2 (ПВ) увеличилось содержание  $C_3S$  и  $C_2S$  в сравнении с составом 1, а степень гидратации снизилась с 70 до 52 % соответственно. Уменьшение степени гидратации объясняется наличием в составе двух крупных непрогидратированных зерен вяжущего (фракция  $150 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), которые образуют запас клинкерного фонда. При добавлении к ПВ отдельно Melflux и «Полидон-А» (составы 3 и 4) наблюдалось незначительное снижение  $C_3S$  и  $C_2S$  на 1–2 % в сравнении с контрольным составом (состав 2). Совместное их введение в ПВ (состав 5) показало незначительное снижение основных клинкерных минералов, при этом степень гидратации увеличилась до 57 % в сравнении с 3-м и 4-м составами. Для повышения стойкости цементного камня против коррозии выщелачивания в состав 6 добавили 15 % МКУ-95. При этом содержание остаточных клинкерных минералов снизилось незначительно, а количество  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  уменьшилось более чем на 26 % в сравнении с контрольным составом. Этот факт является свидетельством протекания пуццолановой реакции, сопровождающейся связыванием  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  микрокремнеземом в менее растворимые и более химически стойкие низкоосновные гидросиликаты кальция.



а



б

Рис. 2. Рентгенофазовый анализ гидратированных образцов цементного камня в возрасте 28 суток твердения: 1-й состав – ЦЕМ I 42,5Н (а); ПВ +  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  + Melflux + Полидон-А + МК (б)

Таблица 2

Фазовый состав цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения

№	Цементный камень	Фазовый состав цементного камня, %				
		$C_3S$	$C_2S$	Эттрингит	Портландит $Ca(OH)_2$	Степень гидратации
0	ЦЕМ I 42,5Н	60,92	11,8	–	–	–
1	ЦЕМ I 42,5Н (гидратированный цементный камень)	24	20	2-3	20,5	70
2	ПВ с фракцией, $m^2/kg$ : 150 (15 %)+ 300 (75 %) + + 450 (10 %) + 3 % гипсовый камень	30	22	2	18,4	52
3	ПВ + 0,3 % Melflux	28	21	2	19,3	54
4	ПВ + 0,2 % «Полидон-А»	27	22	До 2	18,5	51
5	ПВ + 0,3 % Melflux + + 0,2 % «Полидон-А»	26	20	До 2	17,2	57
6	ПВ + 0,3 % Melflux + + 0,2 % «Полидон-А» + + 15 % МК	25/15*	21/10*	1/1*	13,5/10,4*	62/82*

Примечание. \* – через 6 месяцев нормального твердения

Для подтверждения гипотезы о сохранности клинкерного фонда и его постепенного вовлечения в процесс структурообразования на длительных сроках твердения состав 6 дополнительно исследовали через 6 месяцев. При этом установлено снижение  $C_3S$  и  $C_2S$  на 10 и 11 %, портландита – до 10,4 и увеличение степени гидратации с 62 до 82 % соответственно в сравнении с составом 6 (28 суток твердения). Полученные результаты свидетельствуют о положительной роли клинкерного фонда в цементном камне (запас грубодисперсных частиц – фракция 150  $m^2/kg$ ), что в дальнейшем должно повысить долговечность бетона, выполненного на его основе.

Исследования микроструктуры цементного камня показали, что наличие в составе комплексного модификатора (рис. 3в) позволило получить плотный цементный камень упорядоченной структуры с равномерно распределенными порами по всему объему при скоплении игольчатых кристаллов эттрингита в зоне образования микропор. Установлено, что в составе 5 (см. табл. 2) уменьшаются размеры кристаллов – от 70 до 90 нм (рис. 3б), и составе 6 (см. табл. 2) – от 60 до 75 нм (рис. 3в), что значительно ниже, чем в контрольном составе 2 (см. табл. 2) – от 100 до 120 нм (рис. 3а).

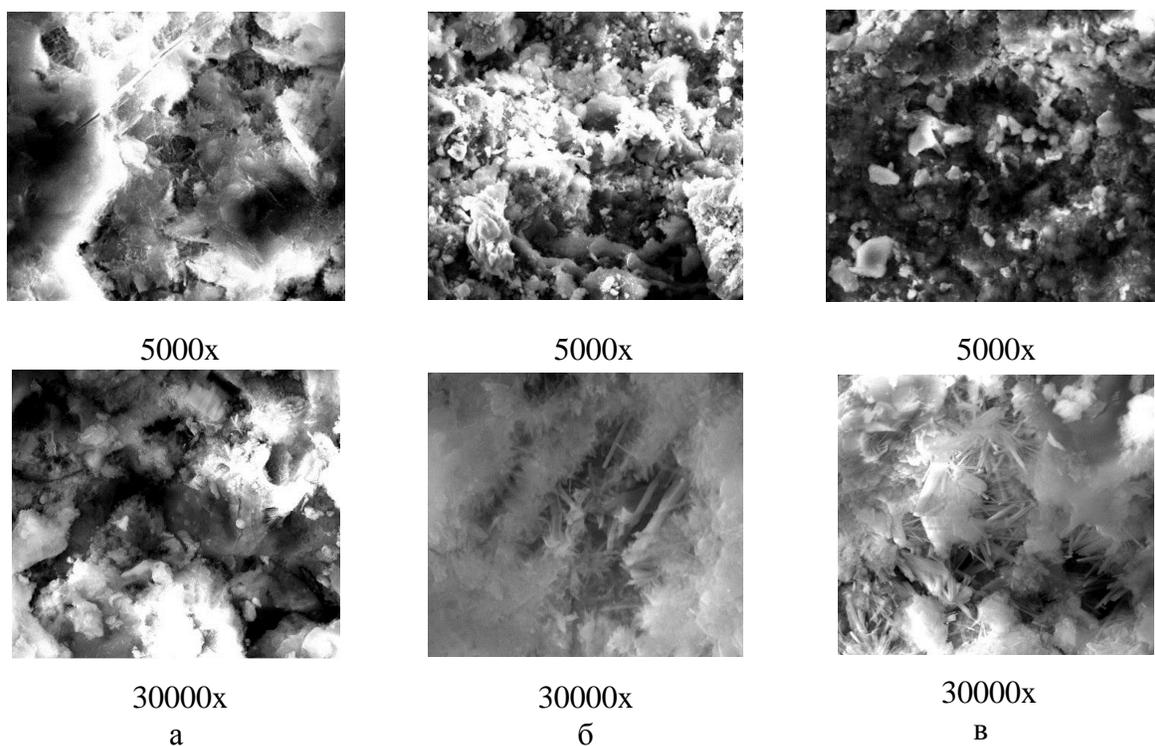


Рис. 3. Микроструктура цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения: ПВ (контрольный) (а); ПВ + 0,3 % Melflux + 0,2 % «Полидон-А» (б); ПВ + 0,3 % Melflux + 0,2 % «Полидон-А» + 15 % МК (в)

Модифицированный цементный камень состава 6 имеет более плотную и однородную мелкопористую структуру с размером микропор от 0,1 до 0,6 мкм (см. рис. 3в); в составе 5 основной диапазон – от 0,5 до 2 мкм (см. рис. 3б); в контрольном образце состава 2 – от 1 до 5 мкм (см. рис. 3а) с присутствием пор до 50 мкм.

Результаты исследований модифицированного цементного камня легли в основу разработки состава тяжелого бетона с заданным комплексом эксплуатационных свойств. В табл. 3 приведены составы тяжелого бетона, на основе которых проводились исследования.

Таблица 3

Исследуемые составы модифицированного тяжелого бетона

Материалы	Расход на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>					
	Состав					
	1 – контрольный	2	3	4	5	6
<i>I</i>	2	3	4	5	6	7
ЦЕМ I 42,5Н	362	–	–	–	–	–
ПВ	–	362	362	362	308	308
МК (15 %)	–	–	–	–	54	54
Вода	180	180	180	180	180	180

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
Щебень	962	962	962	962	962	962
Песок	895	895	895	895	895	895
Melflux 5581F (0,3 %)	1,09	1,09	–	1,09	1,09	1,09
«Полидон-А» (0,2 %)	–	–	0,72	0,72	0,72	0,72
Базальтовое волокно (0,7 %)	–	–	–	–	–	2,16

Анализ результатов исследований (табл. 4) свойств бетонных смесей показал, что предлагаемый состав 6 существенно снизил в 2,5 и 2,2 раза показатели водоотделения и раствооротделения в сравнении с контрольным составом 1. Данный факт играет положительную роль при снижении негативных последствий (это расслоение бетонной смеси, оседание крупного заполнителя и снижение неоднородности бетона). Анализ результатов свойств модифицированных бетонов показал повышение показателей: на сжатие в составе ПВ + 0,3 % Melflux + 0,2 % «Полидон-А» + 15 % МК на 47,9 % относительно контрольного ПЦ (портландцемент) + 0,3 % Melflux и на 19,5 % относительно состава ПВ + 0,3 % Melflux, что составляет в абсолютном выражении на 24 и 12,1 МПа соответственно.

Таблица 4

Результаты исследований бетонных смесей и бетонов

Показатель	Составы					
	1	2	3	4	5	6
	Контрольный ПЦ + 0,3 % Melflux	ПВ + 0,3 % Melflux	ПВ + 0,2 % «Полидон-А»	ПВ + 0,3 % Melflux + 0,2 % «Полидон-А»	ПВ + 0,3 % Melflux + 0,2 % «Полидон-А» + 15 % МК	ПВ + 0,3 % Melflux + 0,2 % «Полидон-А» + 15 % МК + 0,7 % БВ
Удобоукладываемость: марка / осадка конуса, см	П2/5	П2/6	П2/5	П2/6	П2/7	П2/6
$\rho_{\text{ср}}$ смеси, кг/м <sup>3</sup>	2 400	2 400	2 400	2 401	2 401	2 403
Водоотделение смеси, %	0,45	0,31	0,22	0,20	0,19	0,18
Показатель раствооротделения, $P_r$ , %	2,8	1,44	1,37	1,34	1,32	1,28
$R_{\text{сж}}$ , МПа,	50,1	62,0	59,8	72,1	74,1	77,3
$R_{\text{тб}}$ , МПа	5,78	6,54	6,27	6,93	7,73	8,62
Условный коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м <sup>0,5</sup> , $K_c$	0,052 638	0,055 393	0,055 620	0,058 872	0,061 458	0,074 169
Пористость, %	14,52	11,67	10,54	10,12	9,2	8,6
Модуль упругости, МПа, $E_{\sigma}$	25 587	31 235	32 119	36 879	39 876	42 259
$\rho_{\text{ср}}$ , кг/м <sup>3</sup>	2 401	2 408	2 406	2 411	2 420	2 417

Максимальный прирост прочности на растяжение при изгибе  $R_{тб}$  показал бетон с микроармирующим базальтовым волокном (состав 6). Показатель  $R_{тб}$  повысился на 49,1 % в сравнении с контрольным и на 11,5 % в сравнении с составом 5 (без фибры). Повысились показатели максимальной нагрузки на 40,92 % и условного коэффициента интенсивности напряжений на 40,60 %, напряжение при изгибе – на 35,1 % в сравнении с контрольным составом. По результатам гидрофизических испытаний модифицированного бетона (см. табл. 4, состав 6) было установлено, что показатель водопоглощения снизился на 57,8 %, а марка по водонепроницаемости повысилась на 4 ступени нагружения в сравнении с контрольным составом 1.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обосновано и экспериментально доказано технологическое решение получения тяжелого модифицированного бетона на основе цементного вяжущего оптимального состава различной дисперсности (15 % – средний диаметр частиц  $d_{ср} = 12$  мкм с удельной поверхностью  $S_{уд} = 150$  м<sup>2</sup>/кг; 75 % –  $d_{ср} = 6,6$  мкм,  $S_{уд} = 300$  м<sup>2</sup>/кг; 10 % –  $d_{ср} = 4,9$  мкм,  $S_{уд} = 450$  м<sup>2</sup>/кг) с высокой плотностью упаковки совместно с комплексным модификатором (0,3 % Melflux + 0,2 % «Полидон-А» + 15 % МК) и базальтовым волокном (0,7 %). В результате образуется плотный упрочненный цементный камень упорядоченной мелкокристаллической структуры с кристаллами от 60 до 75 нм и равномерно распределенными по всему объему микропорами от 0,1 до 0,6 мкм. Полученные результаты свидетельствуют о том, что наличие тонкой фракции (450 м<sup>2</sup>/кг) позволяет обеспечить высокие темпы роста прочности в ранние сроки твердения, а крупная фракция (150 м<sup>2</sup>/кг) увеличивает запас клинкерного фонда в цементном камне: количество низкоосновных гидросиликатов кальция увеличивается на 17 % по сравнению с контрольным составом, а степень гидратации достигает 82 % (в возрасте 6 мес.). Полученный модифицированный тяжелый бетон обладает повышенными прочностными, гидрофизическими свойствами и высокой стойкостью к коррозии, что положительно влияет на его долговечность. Полученные результаты согласуются с научными работами [9–15].

Было обосновано и экспериментально доказано создание структуры тяжелого бетона высокой плотности, рационально сочетающего необходимые технологические и эксплуатационные характеристики путем оптимизации состава цементного вяжущего различной дисперсности с комплексным модификатором (гиперпластификатор + полимер + микрокремнезем) + базальтовое волокно. Полученный модифицированный бетон имеет следующие показатели: предел прочности на сжатие – 77,3 МПа; предел прочности на растяжение при изгибе – 8,62 МПа; условный коэффициент интенсивности напряжений – 0,074 169 МПа·м<sup>0,5</sup>, водопоглощение – 1,9 %; марка по водонепроницаемости – W14; морозостойкость  $F_1 = 600$ , повышенная стойкость к агрессивным средам.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. 2006. 368 с.
2. Исследование пористости цементного камня, модифицированного комплексными органоминеральными модификаторами / В.И. Соловьев [и др.] // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 8-3. С. 590–595.

3. Самченко С.В., Абрамов М.А., Егоров Е.С. Особенности протекания гидратации и твердения цементных паст с добавкой гидратированного цемента // *Техника и технология силикатов*. 2020. Т. 27. № 1. С. 24–28.
4. Энтин З.Б., Юдович Б.Э. Многокомпонентные цементы. Научн. тр. // *НИИцемент*. 1994. Вып 107. С. 3–76.
5. Величко Е.Г., Шумилина Ю.С. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 235–243.
6. Сравнительный анализ способов модифицирования шлакопортландцемента ультрадисперсным компонентом / С.В. Самченко [и др.] // *Техника и технология силикатов*. 2020. Т. 27. № 4. С. 113–120.
7. Калашников В.И. Промышленность нерудных строительных материалов и будущее бетонов // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 20–23.
8. Суздальцев О.В. Новые высокоэффективные бетоны // *New university. Technical sciences*. 2014. № 7-8 (29-30). С. 44–47.
9. 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.
10. Ткач Е.В., Темирканов Р.И. Улучшение физико-механических свойств модифицированного бетона на основе применения химически активированного микрокремнезема с микроармирующим волокном // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 2 (88). С. 123–135.
11. Филимонова Ю.С., Величко Е.Г. Исследование комплексной модификации тяжелого бетона // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 4 (96). С. 107–109.
12. 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. С. 112–119.
13. Королев Е.В., Иноземцев А.С. Экономические предпосылки применения высокопрочных легких бетонов // *Научно-технический вестник Поволжья*. № 5. 2012. С. 198–206.
14. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Т.К. Реологические особенности цементно-минеральных систем, пластифицированных поликарбоксилатным пластификатором // *Региональная архитектура и строительство*. 2019. № 3 (40). С. 24–34.
15. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М.: Технопроект. 1998. 768 с.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ФИЛИМОНОВА Юлия Сергеевна** – преподаватель кафедры строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, Россия, г. Москва, Ярославское ш., д. 26. E-mail: JuliaS06@mail.ru

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

**СУСАНИНА Татьяна Васильевна** – студентка, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, Россия, г. Москва, Ярославское ш., д. 26. E-mail: tanyu.susanina.02@mail.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Филимонова Ю.С., Ткач Е.В., Сусанина Т.В. Модифицированный бетон для гидромелиоративного строительства // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 4 (20). С. 34–44.

**MODIFIED CONCRETE FOR WATER RECLAMATION CONSTRUCTION**

*Yu.S. Filimonova, E.V. Tkach, T.V. Susanina*  
*Moscow State University of Civil Engineering (Moscow)*

**Abstract.** Within the framework of research the questions related to modification of heavy concrete composition on the basis of polydisperse binder with complex modifier and its influence on the formation of structure and properties of cement stone, as well as hardened concrete are considered. The possibility of obtaining effective heavy concrete for hydromeliorative construction with improved performance properties in terms of strength and hydrophysical characteristics has been substantiated. The influence of three-level disperse composition of clinker component of cement particles on the reduction of inter-particle emptiness and increase of cement stone strength has been investigated. It is noted that the obtained performance indicators make it possible to recommend the modified concrete for the production of building products and structures operating under severe operating conditions, in particular for irrigation system flumes. It is indicated that the prospects for further development of scientific research lie in improving the composition of modified heavy concrete on the basis of polydisperse binder with complex modifier by searching for new types of modifiers and micro reinforcing fillers to reduce the cost of production and study the possibilities of its application in hydraulic structures of the zone of variable water level.

**Keywords:** modified concrete, dispersed composition of the clinker component, complex modifier, durability.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*FILIMONOVA Yulia Sergeevna* – Lecturer at the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia. E-mail: JuliaS06@mail.ru

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

*SUSANINA Tatiana Vasilyevna* – Bachelor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia. E-mail: tanya.susanina.02 @ mail.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Filimonova Yu.S., Tkach E.V., Susanina T.V. Modified concrete for water reclamation construction // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 34–44.

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

УДК 621.3.051.24:658.284

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ  
НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСЕТИ КРУПНОГО ГОРОДА РОССИИ***П.Г. Иванов, К.Б. Корнеев**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Иванов П.Г., Корнеев К.Б., 2023

**Аннотация.** В статье описаны результаты проведенных расчетов работы электросетей крупного города в различных схемах. Рассмотрены проблемы, которые могут возникнуть при отсутствии источников генерации внутри городской системы электроснабжения. Предложены варианты их решения. Рассчитаны возможные варианты развития событий для ведения режима в условиях нормальных и ремонтных схем, а также варианты наложения аварийных отключений на ремонты.

**Ключевые слова:** режим работы электросети, ремонтная схема, аварийное отключение, подстанция, противоаварийная автоматика.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-45-50**

В энергосистемах баланс производства и потребления в любой момент времени достигается постоянным прогнозированием потребления и в соответствии с ним загрузкой электростанций операционной зоны, а также ведением режима диспетчером в условиях меняющейся схемы сети и аварийных отключений.

Энергоисточниками большинства крупных российских городов являются тепловые электростанции (ТЭС) или теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) [1], а также магистральные линии электропередач, обеспечивающие электроснабжение от энергоисточников, расположенных в области размещения города, а также в смежных областях. В качестве узла объединения энергосистемы России и схемы городского электроснабжения выступают одна или несколько узловых подстанций, подключенных на высоком напряжении 220–750 кВ.

Генерирующее и сетевое оборудование многих ТЭС и ТЭЦ уже достаточно долго находится в эксплуатации и выработало нормативный срок службы [2]. Оно физически и морально устарело и требует замены. При этом до настоящего времени эксплуатация оборудования осуществляется за счет регулярных аттестаций оборудования с продлением срока эксплуатации. Ниже будут описаны результаты расчетов установившихся режимов энергосистемы на типичной модели, построенной на основе анализа энергосистем нескольких областей европейской части России. Расчет выполнили с помощью специализированного программного комплекса. Было дано заключение о возможности полного или частичного вывода из эксплуатации генерирующего оборудования на существующих энергопредприятиях.

Рассмотрены следующие режимно-балансовые условия [3]:

режим осенне-зимних максимальных нагрузок (ОЗМ). Он характеризуется максимальным энергопотреблением для большинства типов нагрузки, что связано с увеличением использования систем освещения разных типов, а также (частично) отопительных электроагрегатов;

летний режим максимальных нагрузок. Такой режим для большинства электропотребителей характеризуется снижением потребления относительно осенне-зимнего максимума [4, 5]. Однако в ряде случаев для офисной нагрузки и некоторых промышленных предприятий, оборудованных системами кондиционирования и холодильного оборудования, могут наблюдаться нагрузки, возросшие относительно осенне-зимних.

Расчеты проводились для следующих температурных условий [6]:

зимний режим максимальных нагрузок при расчетной температуре для ОЗМ;

летний режим максимальных нагрузок для периода экстремально высоких температур (ПЭВТ);

летний режим максимальных нагрузок для периода при среднемесячной температуре (ПСМТ) в наиболее теплый месяц.

Расчеты проводились на моделях отдельных районов Единой энергетической системы России для ОЗМ, ПСМТ и ПЭВТ:

1) для сети напряжением 330 кВ:

нормальная схема;

аварийное отключение одного из трансформаторов (автотрансформаторов) на крупных питающих подстанциях;

схема планового ремонта одного автотрансформатора на крупной питающей подстанции;

схема планового ремонта одного автотрансформатора на крупной питающей подстанции и аварийное отключение второго автотрансформатора на ней же;

схема ремонта воздушной линии (ВЛ) высокого напряжения между питающей подстанцией и узловой городской подстанцией, сопровождающаяся аварийным отключением выключателя на питающей подстанции;

2) для городского кольца крупного города (выполнялись как для схемы нормального режима, так и для наиболее тяжелых схем, совмещающих плановые ремонты с аварийными отключениями):

аварийное отключение ВЛ городского кольца;

схема ремонта выключателя на подстанции городского кольца, непосредственно подключенной к узловой городской подстанции;

схема ремонта выключателя ВЛ между ТЭС и узловой подстанцией, сопровождающаяся аварийным отключением ВЛ от узловой подстанции в сторону, противоположную подключенной ТЭС;

схема двойного ремонта выключателя ВЛ городского кольца;

схема двойного ремонта выключателя ВЛ городского кольца с аварийным отключением ВЛ городского кольца.

В результате расчетов авторами были выявлены риски выхода параметров электроэнергетического режима из области допустимых значений в следующих случаях [3]:

**1. В схеме ремонта одного трансформатора и аварийном отключении второго трансформатора на узловой подстанции** до вывода из эксплуатации турбогенераторов на ТЭС (ТЭЦ) параметры режима находятся, как правило, в области допустимых значений, превышение аварийно допустимых токовых нагрузок (АДТН) отсутствует, напряжение остается выше аварийно допустимого.

После вывода из эксплуатации генерирующего оборудования на ТЭС (ТЭЦ) при выведенном в ремонт трансформаторе узловой подстанции превентивно должны проводиться следующие мероприятия:

включение батарей статических конденсаторов в смежных районах области (или в соседних областях);

изменение топологии сети путем отключения наиболее загруженных линий электропередачи со стороны узловой подстанции.

При двух отключенных трансформаторах на узловой подстанции параметры режима будут находиться вне области допустимых значений: окажутся перегружены оставшиеся в работе трансформаторы выше АДТН.

Выявленные риски подтверждаются значениями, полученными при расчете режимов в источнике [1]. При проведении дополнительных схемно-режимных мероприятий посредством изменения топологии сети и генерации больших центров питания параметры режима также могут находиться вне области допустимых значений. Потребуется ввод графиков аварийного ограничения режима потребления для возвращения параметров режима в область допустимых. Таким образом, для обеспечения допустимых параметров режима требуется установка автоматики ограничения перегрузки оборудования (АОПО), производящей отключение нагрузки потребителей. В настоящее время такие нагрузки могут быть достаточно значительными (до 25 % от установленной мощности энергосистемы города) и требуют согласования и выбора потребителей, для которых будет введен режим ограничения нагрузки (преимущественно третьей категории надежности).

## ***2. Аварийное отключение одной из ВЛ, которая питает город в схеме двойного ремонта ВЛ, или оборудования, входящих в состав городского кольца.***

После вывода из эксплуатации генерирующего оборудования на ТЭС (ТЭЦ) параметры режима, как правило, будут находиться вне области допустимых значений после проведения всех возможных схемно-режимных мероприятий [1]. Возникнет перегрузка оставшихся в сложившейся схеме работы ВЛ, отходящих от главного питающего центра города (узловой подстанции). В этой ситуации, чтобы обеспечить допустимые параметры режима в период летнего максимума ПСМТ, для ремонтов по городскому кольцу требуется установка АОПО в объеме, сопоставимом с рассмотренным в варианте 1.

По результатам проведенных расчетов можно сделать вывод о значительном влиянии генерации городских ТЭС (ТЭЦ) на режимы работы электросети крупного города и невозможности выполнения ремонтов оборудования из-за рисков аварийных отключений, которые повлекут за собой выход параметров из области допустимых значений при отсутствии источников генерации внутри городского кольца [3].

Для приведения режимных параметров в область допустимых значений в рассмотренных схемно-режимных и балансовых условиях без превентивного ввода графиков аварийного ограничения режима потребления необходима реализация новой противоаварийной автоматики, а именно проектирование и установка устройств автоматического ограничения перегрузки оборудования и автоматического ограничения снижения напряжения на узловых подстанциях, действующих по каналам передачи аварийных сигналов и команд на отключение нагрузки потребителей в городе и, возможно, смежных энергорайонах. В рассматриваемых районах могут отсутствовать крупные потребители, и для организации управляющих воздействий на отключение нагрузки необходимо создание большого числа каналов передачи управляющих

воздействий. При срабатывании противоаварийной автоматики такие потребители могут быть отключены на весь период до устранения причин срабатывания автоматики, что может привести к нарушениям технологических процессов на предприятиях, недоотпуску продукции, браку и значительным экономическим потерям.

Так как необходимая новая противоаварийная автоматика должна иметь сложную функциональную структуру и действовать на большой объем нагрузки, авторами предлагается также рассмотреть замещающие мероприятия, связанные с реконструкцией объектов электроэнергетики и сетевым строительством [1]:

строительство новых резервных узловых подстанций на напряжении 220 или 330 кВ на стороне городского кольца, противоположной уже установленной городской узловой подстанции, и линий электропередач соответствующего класса напряжения к этой подстанции от имеющегося центра питания. Дополнительно строительство такой подстанции будет способствовать как повышению надежности электроснабжения бытовых потребителей в активно застраиваемых зонах города, так и обеспечению качественного и надежного электроснабжения уже сложившихся городских зон. В дальнейшем (например, при строительстве высокоскоростных железнодорожных магистралей [8, 9]) возможно совмещение таких подстанций с планируемыми для ввода тяговыми подстанциями, что благотворно скажется на обеспечении надежности электроснабжения данного участка электрифицированной железной дороги;

установку на узловых подстанциях дополнительных трансформаторов (авто-трансформаторов). Как правило, узловые подстанции обладают резервом площади для установки дополнительного оборудования. Однако это может потребовать строительства дополнительной линии от узла питания, внешнего к городскому кольцу, что может быть затруднительно в плане обеспечения габаритов прохождения этой линии параллельно уже построенным линиям;

замену проводов городского кольца проводами с большей пропускной способностью [9] типа АСВП, АСВТ российских компаний.

Таким образом, проекты модернизации систем теплоснабжения крупных городов европейской части России, которые предусматривают поэтапный вывод из эксплуатации городских ТЭС и ТЭЦ, а также строительство замещающих объектов (котельных), могут столкнуться с определенными сложностями, связанными с необходимостью также обеспечить и значительное замещение электрических мощностей региона [10].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2023–2028 годы: приказ Минэнерго России от 28.02.2023 № 108. URL: <https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/24125/204377> (дата обращения: 04.11.2023).
2. Показатель технического состояния объектов электроэнергетики (физический износ). URL: <https://minenergo.gov.ru/node/22444> (дата обращения: 04.11.2023).
3. Об утверждении Правил вывода объектов электроэнергетики в ремонт и из эксплуатации, а также о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросу совершенствования порядка вывода объектов электроэнергетики в ремонт и из эксплуатации: постановление Правительства РФ от 30.01.2021 № 86 (с изменениями и дополнениями).
4. РД 34.20.185-94 Инструкция по проектированию городских электрических сетей. М.: Энергоатомиздат. 1995. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004921> (дата обращения: 30.10.2023).

5. Корнеев К.Б., Павлова Ю.М., Осеи-Овусу Р. Алгоритмические модели управления электрической нагрузкой в системах электроснабжения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 3 (15). С. 40–50.
6. Расчеты допустимых перетоков мощности в энергосистемах / С.А. Ерошенко [и др.]. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2017. 86 с.
7. Высокоскоростные магистрали. Земельно-имущественный комплекс. URL: <http://www.hsrail.ru/Projects-vsm/ZIO/> (дата обращения: 04.11.2023).
8. О единой технической политике в электросетевом комплексе: положение ПАО «Россети» (новая редакция). Приложение 1 к решению Совета директоров ПАО «Россети» (протокол заседания от 02.04.2021 № 450). URL: [https://rosseti-lenenergo.ru/upload/\\_about/tehnikeskay\\_politika/Положение%20о%20ЕТП.pdf](https://rosseti-lenenergo.ru/upload/_about/tehnikeskay_politika/Положение%20о%20ЕТП.pdf) (дата обращения: 04.11.2023).
9. СТО 56947007-29.060.50.268-2019 Указания по проектированию ВЛ 220 кВ и выше с неизолированными проводами нового поколения. URL: <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/db2/ekwjram0zzcmam5zmpo71wserqm65f07.pdf> (дата обращения: 04.11.2023).
10. СТО 59012820.27.010.002-2020 Правила перехода на работу в вынужденном режиме (с изменениями на 07.07.2023). URL: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/standard\\_forced\\_2023.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/standard_forced_2023.pdf) (дата обращения: 04.11.2023).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*ИВАНОВ Павел Геннадьевич* – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: Paveliv83@mail.ru

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Иванов П.Г., Корнеев К.Б. Анализ влияния генераторов тепловых электростанций на режимы работы электросети крупного города России // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023, № 4 (20). С. 45–50.

---

### ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF GENERATORS OF THERMAL POWER PLANTS ON THE OPERATING MODES OF THE POWER GRID OF A LARGE RUSSIAN CITY

*P.G. Ivanov, K.B. Korneev*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article describes the results of calculations of the operation of power grids of a large city in different schemes. The problems that may arise in the absence of generation sources within the city power supply system are considered. The variants of their solution are offered. Possible variants of development of events for conducting the regime under normal and repair schemes, as well as variants of imposing emergency shutdowns on repairs are calculated.

**Keywords:** power grid operation mode, repair scheme, emergency shutdown, substation, emergency automation.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*IVANOV Pavel Gennadievich* – Master’s Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: Paveliv83@mail.ru

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

### CITATION FOR AN ARTICLE

Ivanov P.G., Korneev K.B. Analysis of the influence of generators of thermal power plants on the operating modes of the power grid of a large Russian city // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 45–50.

УДК 674.093

## ВЛИЯНИЕ МЕТЕОФАКТОРОВ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ОСАДКОВ, ВЫПАВШИХ В ТВЕРИ В 2016–2022 ГГ.

*Ф.В. Качановский*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Качановский Ф.В., 2023

**Аннотация.** Выполнен статистический анализ влияния метеофакторов на удельную электропроводность атмосферных осадков, выпавших в Твери в 2016–2022 годах. 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: 10.46573/2658-7459-2023-4-50-58**

Электропроводность атмосферных осадков, являясь одним из индикаторов антропогенного воздействия на водную среду, представляет научный и практический интерес. Публикации об электропроводности достаточно многочисленны и разнообразны [1–7].

В Твери наблюдения за метеофакторами, в том числе и за электропроводностью атмосферных осадков, проводит лаборатория мониторинга окружающей среды Тверского центра по гидрометеорологии. Наблюдения за электропроводностью осадков данная

лаборатория ведет с 2016 года. Интервалы между измерениями изменяются от одних суток до двух декад в зависимости от частоты выпадения осадков. Всего в течение 2016–2022 годов были сделаны 904 измерения удельной электропроводности (около 11 измерений в месяц) [8]. Электропроводность (удельная) осадков измеряется в мкСм/см (микросименсы на сантиметр). Ряд измеренных (срочных) значений удельной электропроводности осадков (далее обозначается как  $sw$ ) показан на рис. 1.

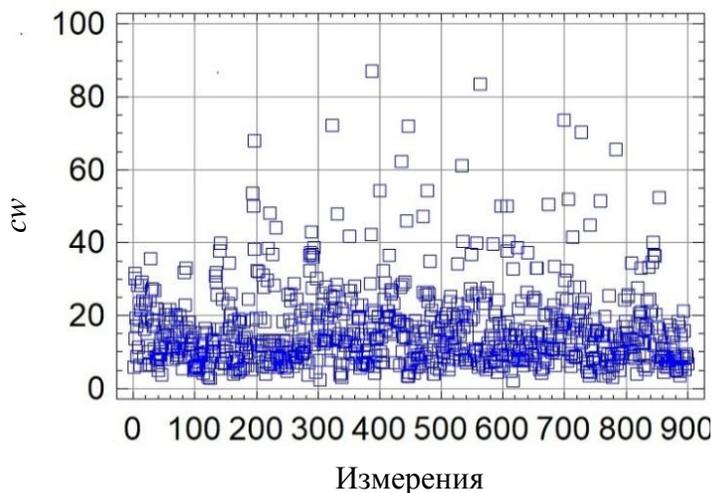


Рис. 1. Измеренные срочные значения удельной электропроводности  $sw$  (2016–2022 годы)

Временная последовательность срочных значений удельной электропроводности  $sw$  преобразована в ряд среднемесячных значений  $amsw$  с равномерным месячным интервалом, что позволяет применить к  $sw$  в качестве эффективного инструмента статистический анализ [11]. Этот прием уже был использован в статьях [3–7].

С учетом опыта применения статистического анализа к рядам показателя кислотности [8] в качестве моделей трендов  $sw$  и  $amsw$  принята кубическая модель. Уравнения кубических трендов семилетнего ряда наблюдений для величин  $sw$  и  $amsw$  имеют вид:

$$sw = 13,3325 + 0,019\ 899\ 6 \cdot n - 0,000\ 029\ 501\ 8 \cdot n^2 + 0,000\ 000\ 008\ 482\ 23 \cdot n^3; \quad (1)$$

$$amsw = 14,759\ 5 + 0,019\ 142\ 6 \cdot n + 0,003\ 066\ 06 \cdot n^2 - 0,000\ 042\ 797 \cdot n^3. \quad (2)$$

Следует отметить, что численные значения коэффициентов у членов третьей степени в формулах (1) и (2) весьма малы и их без существенной погрешности можно отбросить, что превратит кубические модели в квадратические.

Тренды, соответствующие формулам (1) и (2), представлены на рис. 2 и 3. В обоих случаях тренды слабо искривлены и имеют максимум в срединной части, соответствующей концу 2019 года. Сходство трендов  $sw$  и  $amsw$  дает основание предполагать, что при статистическом анализе можно ограничиться изучением свойств  $amsw$ , не потеряв ничего существенного.

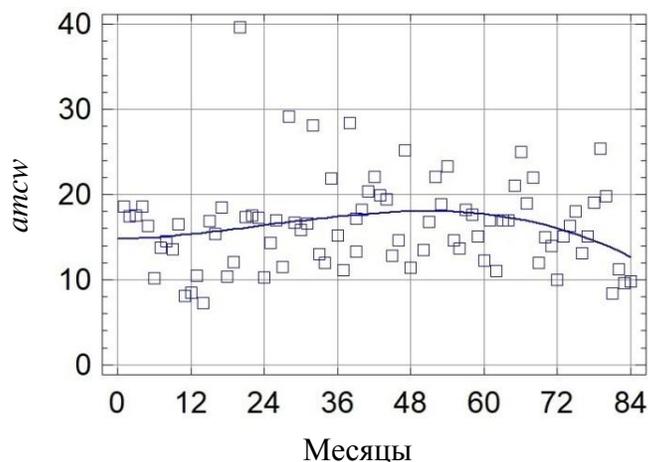


Рис. 2. Кубический тренд  $amtsw$  семилетнего ряда наблюдений (2016–2022 годы)

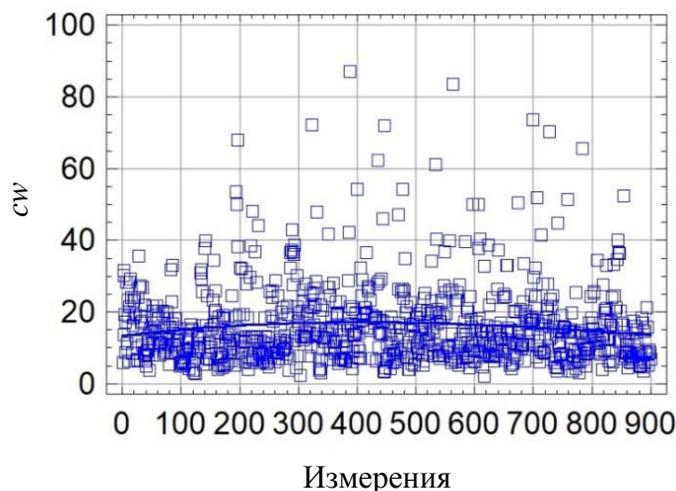
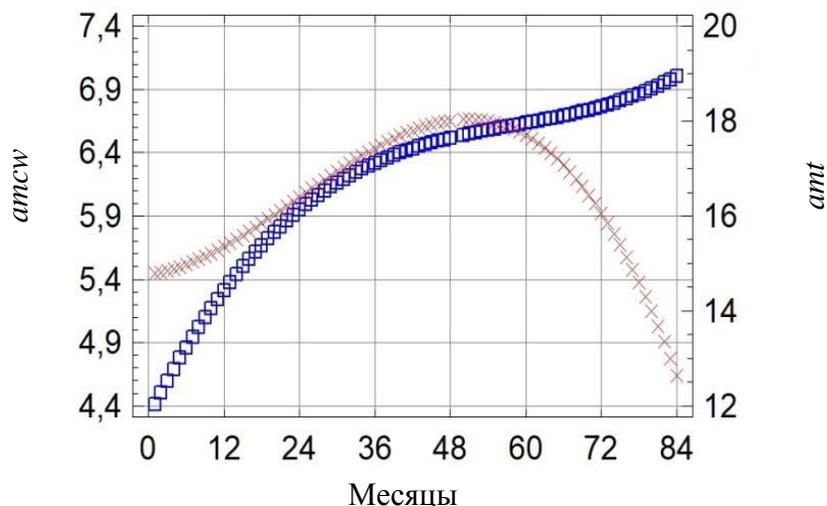


Рис. 3. Кубический тренд  $sw$  семилетнего ряда наблюдений (2016–2022 годы)

Представляет интерес связь электропроводности с таким метеофактором, как температура воздуха  $t$ . Уравнение кубического тренда среднемесячных температур воздуха  $amt$  имеет вид:

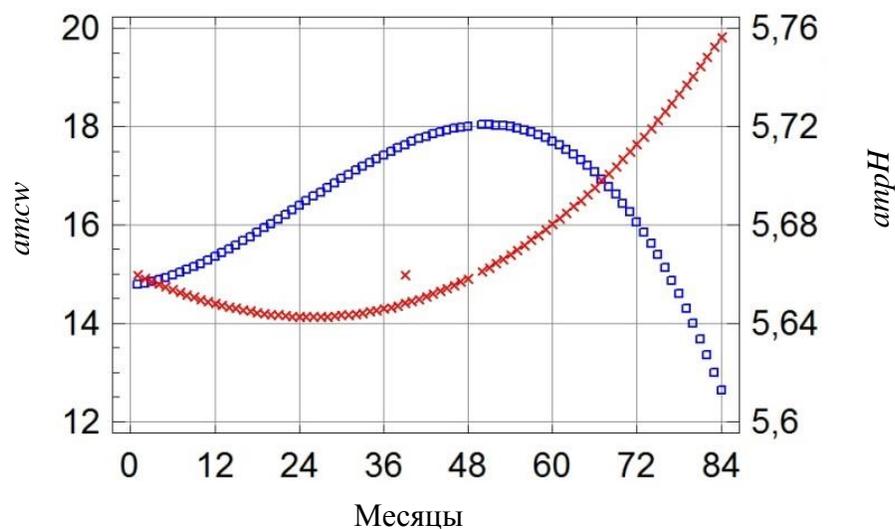
$$amt = 4,310\ 58 + 0,100\ 967 \cdot n - 0,001\ 579\ 14 \cdot n^2 + 0,000\ 009\ 035\ 7 \cdot n^3. \quad (3)$$

Для сравнения кубические тренды  $amtsw$  и  $amt$  показаны на рис. 4. Тренд  $amtsw$  имеет выраженный максимум, который, как уже отмечалось, приходится на конец 2019 года, а тренд температуры  $amt$  монотонно растет в течение всего интервала наблюдений (2016–2022 годы). Это указывает на отсутствие существенного взаимовлияния обсуждаемых факторов. При этом на тренде температуры заметен перегиб, совпадающий по времени с максимумом тренда электропроводности, однако эта деталь требует более обстоятельного рассмотрения.

Рис. 4. Кубические тренды  $atcsw$  и  $amt$  (2016–2022 годы)

Коэффициент линейной корреляции сравниваемых трендов имеет значение 0,303 27, что свидетельствует о существовании относительно слабой (однако статистически значимой на 99%-м уровне доверия) связи между сравниваемыми величинами.

Сопоставление кубических трендов рядов электропроводности  $atcsw$  и показателя кислотности осадков  $atpH$ , представленное на рис. 5, показывает противоположный характер их поведения в течение всего интервала наблюдений за ними.

Рис. 5. Кубические тренды семилетних рядов  $atcsw$  и  $atpH$  (2016–2022 годы)

Уравнения кубических трендов  $atcsw$  и  $atpH$  для семилетнего ряда наблюдений имеют вид:

$$atcsw = 14,759\ 5 + 0,019\ 142\ 6 \cdot n + 0,003\ 066\ 06 \cdot n^2 - 0,000\ 042\ 797 \cdot n^3; \quad (4)$$

$$atpH = 5,681\ 93 + 0,004\ 000\ 86 \cdot n - 0,000\ 314\ 676 \cdot n^2 + 0,000\ 003\ 656\ 84 \cdot n^3. \quad (5)$$

Линейный коэффициент корреляции трендов семилетнего ряда наблюдений составляет  $-0,950\ 643$ , в то время как для шестилетних рядов [7] корреляция несколько слабее, ее коэффициент равен  $-0,871\ 64$ . Это объясняется, по нашему мнению, тем, что при удлинении рядов их тренды становятся более пологими, более похожими друг на друга, и корреляция растет. Синхронность глобальных экстремумов противоположного знака, которая наблюдалась у шестилетних рядов [7], у семилетних исчезла в результате распрямления их трендов.

Удлинение ряда *amsw* на два года (то есть до семи лет) привело к дальнейшему изменению формы кубической модели его тренда (см. рис. 5) по сравнению с предыдущими исследованиями. С удлинением ряда год от года максимум тренда наступал все позже: от января 2019 года у четырехлетнего ряда до марта 2020 года у семилетнего. Отметим еще одну особенность: чем длиннее ряд, тем больше отстает момент наступления максимума кубического тренда от окончания процесса наблюдений. Одновременно с удлинением конечных нисходящих участков трендов происходит уменьшение их наклона.

Сравнение трендов электропроводности *amsw* (см. рис. 5) и количества выпадающих осадков *ampre* (рис. 6) для семилетнего ряда наблюдений указывает на их обратную связь. Связь эта характеризуется относительно слабой, но статистически значимой корреляцией с коэффициентом  $-0,122\ 57$ . Для ряда срочных значений корреляция между электропроводностью *sw* и осадками *pre* более сильная, ее коэффициент корреляции составляет  $-0,213\ 567$ .

В статье [4] сделана попытка перейти от однофакторных зависимостей электропроводности от метеофакторов к двухфакторной зависимости с целью отображения совокупного влияния на электропроводность кислотности осадков и температуры воздуха в пятилетнем ряду наблюдений. В настоящей работе проводится сравнение уравнений регрессии для пятилетнего и семилетнего рядов наблюдений.

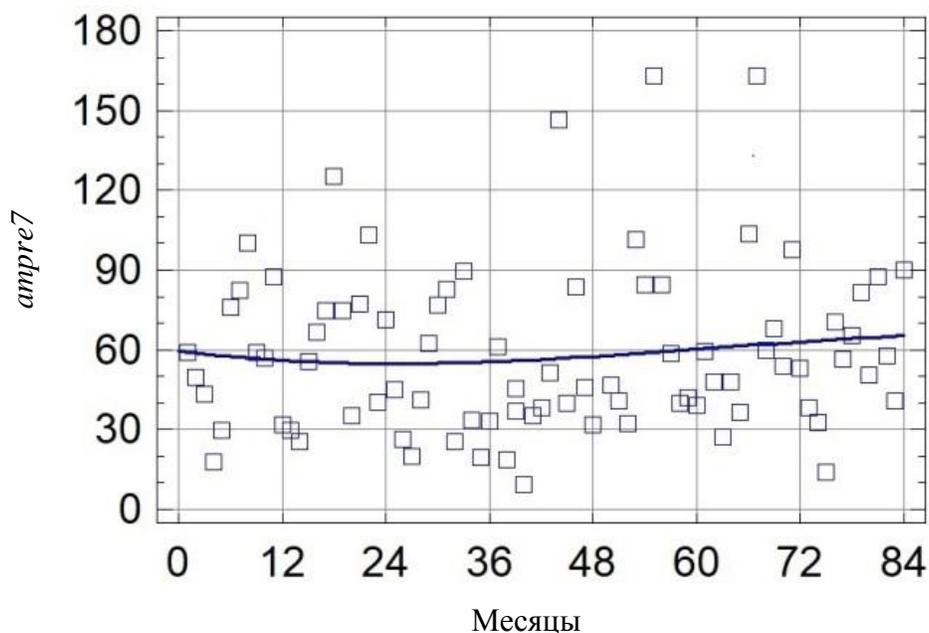


Рис. 6. Кубический тренд среднемесячных осадков *ampre* (2016–2022 годы)

Уравнения регрессии имеют вид:

для срочных значений  $sw$ :

ряд длиной 5 лет

$$sw = -2,918\ 24 + 3,153\ 28 \cdot pH + 0,199\ 623 \cdot t; \quad (6)$$

ряд длиной 7 лет

$$sw = 2,102\ 33 + 2,169\ 26 \cdot pH + 0,253\ 368 \cdot t; \quad (7)$$

для среднемесячных значений:

ряд длиной 5 лет

$$amsw = -3,737\ 42 + 3,489\ 97 \cdot ampH + 0,119\ 535 \cdot amt; \quad (8)$$

ряд длиной 7 лет

$$amsw = 10,472\ 2 + 0,830\ 2 \cdot ampH + 0,200\ 695 \cdot amt. \quad (9)$$

Изменения значений коэффициентов уравнений (7) и (9) в результате удлинения ряда наблюдений имеют сходный, но не идентичный характер. Наблюдается рост значений всех коэффициентов: свободные члены существенно увеличились и стали положительными, коэффициенты при  $pH$  тоже выросли, но более умеренно. Наиболее скромный рост коэффициентов при  $t$ . Все коэффициенты в (7) и (9) статистически значимы. Из двух факторов более влиятельным представляется показатель кислотности осадков  $pH$ . Знаки членов уравнений (7) и (9) указывают на то, что с увеличением значений показателя кислотности и температуры воздуха электропроводность осадков растет.

Включение в круг факторов влияния на электропроводность срочного количества осадков  $pre$  (мм) приводит к уравнению трехфакторной регрессии:

для ряда длиной 5 лет

$$sw = 5,158\ 88 + 2,050\ 1 \cdot pH + 0,288\ 872 \cdot t - 0,492\ 704 \cdot pre; \quad (10)$$

ряда длиной 7 лет

$$sw = -7,829\ 56 + 4,033\ 22 \cdot pH - 0,044\ 073 \cdot t + 0,012\ 357 \cdot pre. \quad (11)$$

В этом случае относительно большое удлинение ряда (5 лет + 2 года) привело к существенным изменениям всех коэффициентов уравнения (11) по сравнению с уравнением (10). Это означает, что тренды при такой длине ряда еще находятся на этапе формирования.

Для оценки влияния на внутригодовую динамику удельной электропроводности осадков  $amsw$  таких метеофакторов, как  $ampH$ ,  $amt$  и  $sumpre$ , используем уже применявшуюся для этого в статье [5] методику, т.е. рассчитаем сезонные компоненты семилетних временных рядов данных факторов. Примем равным 12 месяцам продолжительность периода сезонных колебаний всех факторов  $p$ . В качестве оценки сезонной компоненты используем среднее  $\hat{s}_i$  отклонение значений  $amsw$  от тренда [11], положив для среднемесячной электропроводности

$$\hat{s}_i = \frac{1}{m+1} \cdot \sum_{l=0}^m (amsw_{i+lp} - \hat{tr}_{i+lp}) \quad \text{для } i = 1, \dots, p, \quad (12)$$

где  $m + 1 = 7$  – число (годовых) периодов в ряду наблюдений. Рассчитаем таким же образом среднее  $\hat{s}_i$  отклонение значений  $pH$ ,  $t$  и  $pre$  от их трендов. Годовой ход сезонных компонент (месячных индексов) показан на рис. 7.

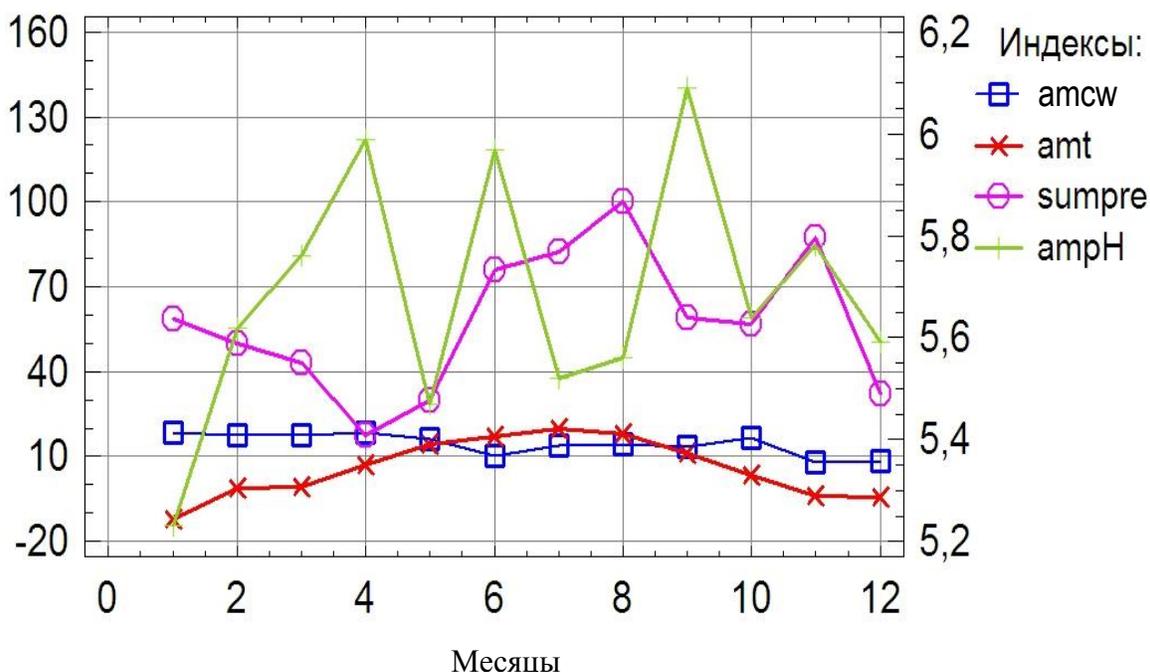


Рис. 7. Годовой ход сезонных (месячных) индексов рядов *amcw*, *amH*, *amt* и *sumpre* (2016–2022 годы)

Индексы удельной электропроводности *amcw* колеблются с небольшой амплитудой и почти незаметно убывают от начала к концу года. Такой характер поведения индекса *amcw*, отличающий его от поведения других факторов, демонстрируемых на рис. 7, косвенно указывает на то, что они слабо влияют на *amcw*.

График хода индексов осадков *sumpre* характерен глубоким апрельским засушливым провалом и дождливыми июлем и ноябрем.

Внутригодовая динамика температур воздуха *amt* традиционна (летом теплее, чем зимой) и не нуждается в отдельном обсуждении.

На графике индексов показателя кислотности осадков *amH* обращают на себя внимание три максимума: апрельский, июньский и сентябрьский, между которыми размещаются майский и июльский минимумы. Отмеченные локальные экстремумы *amH* существовали уже и в пятилетнем ряде [4].

### ВЫВОДЫ

Подведем итоги проведенного исследования:

1. В результате удлинения на два года ряда наблюдений за удельной электропроводностью осадков, показателем кислотности *pH*, температурой воздуха и количеством осадков, выпавших в Твери за 2016–2022 годы, произошли заметные изменения параметров моделей корреляционных связей между электропроводностью и названными метеофакторами.

2. Были построены уточненные регрессионные однофакторные, двухфакторные и трехфакторные модели связей.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Качество воды в Центральной Азии: база знаний: общие и суммарные показатели качества вод: электропроводность. URL: [http://www.cawaterinfo.net/water\\_quality\\_in\\_ca/hydrochem1.htm](http://www.cawaterinfo.net/water_quality_in_ca/hydrochem1.htm) (дата обращения: 14.04.2018).
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.
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. Тверской центр гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. URL: <http://tvermeteo.ru/?id=9> (дата обращения: 23.08.2023)
9. 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.
10. Голицын А.Н. Инженерная геоэкология. Москва: Оникс. 2007. 202 с.
11. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере. М.: ИНФРА-М. 1998. 528 с.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ**

*КАЧАНОВСКИЙ* Феликс Вячеславович – доцент кафедры гидравлики, теплотехники и гидропривода, 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. Влияние метеофакторов на электропроводность осадков, выпавших в Твери в 2016–2022 гг. // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 4 (20). С. 50–58.

**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 2016–2022 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.

**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.kachanovsky@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. 4 (20), pp. 50–58.

**УДК 44.31.03:45.43.00:53.07.00****ПРОВЕРКА НА СООТВЕТСТВИЕ ИСТИНЕ  
ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ.  
ЧАСТЬ I. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ПО ЗАКОНАМ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ***А.Н. Макаров**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., 2023

**Аннотация.** Приведены примеры расчетов теплообмена газовых объемов с поверхностями нагрева по законам теплового излучения цилиндрических газовых объемов. Указано, что примеры расчетов подтверждают истинность пяти законов теплового излучения газовых объемов электрических дуг и факелов. Исследователям и читателям предложено на компьютере с помощью программы «Компас» проверить истинность законов теплового излучения газовых объемов.

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

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-58-66*****ВВЕДЕНИЕ***

На протяжении всего XX века, вплоть до открытия автором законов теплового излучения газовых объемов отсутствовала информация о следующих процессах, происходящих в факельных топках паровых котлов, печах, камерах сгорания (КС) газотурбинных установок (ГТУ), газотурбинных двигателей (ГТД), жидкостных реактивных двигателей (ЖРД) [1–12]:

- 1) распределении мощности излучения по высоте и объему факела в топке;
- 2) способах выравнивания тепловых потоков по периметру и по высоте топок;
- 3) влиянии горизонтальной части факела на прогорание узлов горелок;
- 4) причинах неравномерности отложений внутри труб по периметру и высоте топок;
- 5) распределении мощности факела по высоте топок;
- 6) распределении потоков излучений по высоте, ширине, длине нагреваемых изделий;
- 7) способах выравнивания тепловых потоков по поверхностям нагрева;
- 8) влиянии параметров факела – длины, угла наклона к поверхности нагрева, угла раскрытия, расположения изотерм – на скорость и равномерность нагрева изделий в печах;
- 9) воздействии на параметры факела для повышения производительности печей;
- 10) величине и распределении тепловых потоков излучения факела по поверхности нагрева КС ГТУ, ГТД, ЖРД;
- 11) местоположении в КС максимальных тепловых потоков излучения факела для организации эффективного охлаждения данной поверхности;
- 12) способах организации максимального срока службы пламенной трубы и о влиянии на срок службы распределения мощности по длине и ширине факела;
- 13) распределении мощности излучения факела по объему КС ГТУ, ГТД, ЖРД.

В настоящее время информацию о величине тепловых потоков излучения факела на поверхности КС летательных аппаратов космического и оборонного значения получают экспериментальным путем.

Ни один из существующих в России и промышленно развитых странах численных и других методов расчета не давал полного представления об указанных процессах. Данные о локальном теплообмене получали многолетними трудоемкими опытно-экспериментальными исследованиями теплообмена в факельных печах, топках, КС ГТУ, ГТД, ЖРД.

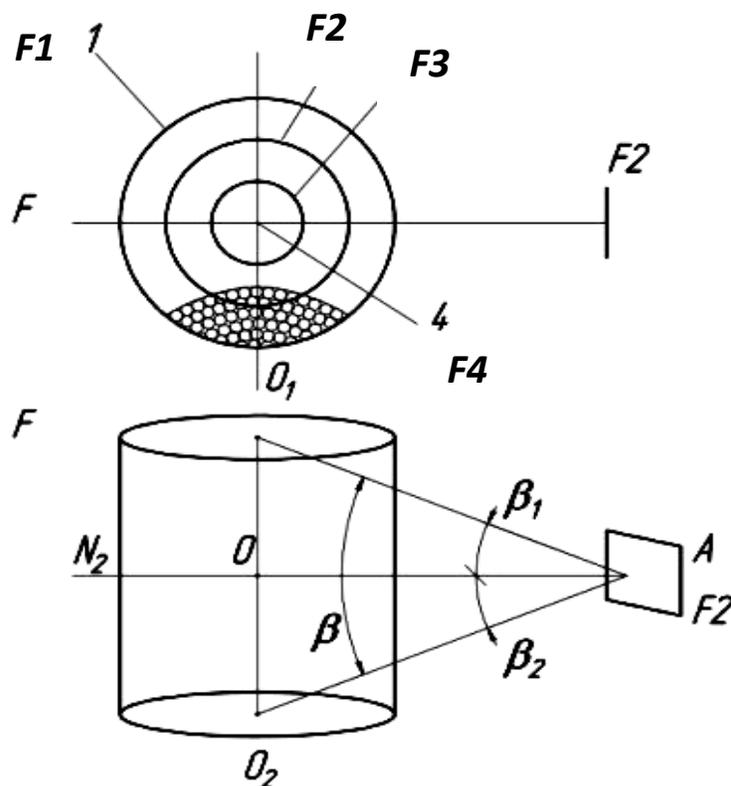
В конце XX – начале XXI века, в 1996–2001 годах автором были открыты законы теплового излучения газовых объемов электрических дуг, факелов. По положительным результатам экспертизы заявки в НИТУ МИСИС, ЦНИИЧермет, ИМЕТ РАН в 2011 году Международной академией авторов научных открытий и изобретений зарегистрировано научное открытие «Закономерная связь между параметрами излучения изотермических коаксиальных цилиндрических газовых слоев, образующихся при факельном сжигании топлива и горении электрической дуги в парах металлов при атмосферном давлении». В дипломе на научное открытие с целью соблюдения многовековых научных традиций и авторского права законы излучения газовых объемов электрических дуг, факелов названы законами Макарова [2, 4–6].

### ИЗЛУЧЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ И ФАКЕЛОВ НА РАСЧЕТНУЮ ПЛОЩАДКУ

Рассмотрим излучение части факела (рисунок), а именно одного из его цилиндрических газовых объемов. Цилиндрический изотермический газовый объем  $F$  излучает на расчетную площадку  $F_2$ . Размер площадки  $0,5 \times 0,5$  м.

Диаметр цилиндрического объема  $D = 3$  м, высота  $h = 3$  м. Допустим, в газовом объеме факела одновременно излучают  $15 \cdot 10^{25}$  атомов, равномерно заполняющих объем. Атомы, заполняющие объем, моделируются шарами (рисунок). Перпендикуляр  $N_2$  в центр  $A$  площадки  $F_2$  проходит через центр симметрии объема точку  $O$  и делит ось  $O_1O_2$  пополам между верхними и нижними основаниями цилиндрического объема. Расстояние  $AO = r = 3$  м. Мощность, выделяющаяся в цилиндрическом газовом объеме факела  $P_F$  при сгорании топлива,  $P_F$  равна 42 МВт, коэффициент поглощения газовой среды  $k = 0,162$  [2].

Разделим расчётный цилиндрический газовый объем на три равных по объему цилиндрических тела (рисунок, вид сверху; радиусы даны условно, без отражения реального соотношения). В каждом из коаксиальных изотермических цилиндрических газовых объемов  $F_1, F_2, F_3$  расположено  $15 \cdot 10^{25} / 3 = 5 \cdot 10^{25}$  излучающих кванты атомов и выделяется мощность  $42 / 3 = 14$  МВт. Ось цилиндрических газовых объемов  $F_1-F_3$   $O_1O_2$  представляет собой цилиндрический газовый объем  $F_4$  бесконечно малого диаметра.



Излучение цилиндрического газового объема на расчетную площадку:  $\beta$  – угол, под которым цилиндрический газовый объем  $F_4$  излучает в центр  $A$  расчетной площадки  $F_2$ ;  $\beta_1$  – угол между нормалью в точке  $A$  расчетной площадки  $F_2$  и направлением  $AO_1$ ;  $\beta_2$  – угол между нормалью в точке  $A$  расчетной площадки  $F_2$  и лучом  $AO_2$

Согласно первому закону теплового излучения газовых объемов [1], плотность потока теплового излучения, падающего от цилиндрического газового объема на расчетную площадку  $q_{FF2}$ , прямо пропорциональна мощности  $P_F$  и локальному угловому коэффициенту излучения газового объема на расчетную площадку  $q_{FF2}$  и обратно пропорциональна коэффициенту поглощения газовой среды  $k$ , средней длине пути лучей  $l$  от излучающих атомов газового объема и площади расчетной площадки  $F2$ :

$$q_{FF2} = \frac{\varphi_{FF2} P_F}{F2 \cdot e^{kl}} \quad (1)$$

В выражении (1) сложность представляет расчет углового коэффициента  $\varphi_{FF2}$  и средней длины пути  $l$  лучей. В зональном и численном методах газовые объемы факелов разбивают на 1,5 млн ячеек [1, 2]. Угловым коэффициентом излучения  $j$ -го параллелепипеда, заполненного газом, на площадку  $dF$  находится с помощью трехкратного интегрирования в сферических координатах:

$$\varphi_{jdF} = \int_{a_j} \int_{b_j} \int_{h_j} \frac{\cos \alpha_i \cos \beta_i}{2\pi r_j^2} da d\beta dr, \quad (2)$$

где  $\alpha_i$  – угол между перпендикуляром к грани параллелепипеда и кратчайшей прямой  $r_j$  до площадки  $dF$ ;  $\beta_j$  – угол между перпендикуляром к площадке  $dF$  и прямой  $r_j$ .

Для расчета средней длины пути лучей от ячеек до расчетной площадки необходимо решение трехкратного интегрального уравнения, аналогичного (2). Указанные законы теплового излучения позволяют рассчитать теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных печах, топках, КС законы теплового излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов [13–16].

### **ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ИСТИННОСТИ ТРЕТЬЕГО ЗАКОНА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ**

Согласно третьему закону Макарова, средняя длина пути лучей  $l_1, l_2, l_3$  от множества излучающих атомов каждого из  $n$  изохорных изотермических коаксиальных цилиндрических газовых объемов до расчетной площадки равна среднеарифметическому расстоянию  $l$  от оси симметрии объемов до расчетной площадки [16]:

$$l_1 = l_2 = l_3 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} \right) = l \quad (3)$$

Для цилиндрических газовых объемов средняя длина пути лучей  $l_1, l_2, l_3$  от  $5 \cdot 10^{25}$  атомов каждого из цилиндрических объемов до расчетной площадки  $F2$  равна среднеарифметическому расстоянию от  $5 \cdot 10^{25}$  атомов каждого из объемов до расчетной площадки  $F2$  и она же равна среднеарифметическому расстоянию  $l$  от оси симметрии  $O_1O_2$  до расчетной площадки  $F2$ :

$$l_1 = l_2 = l_3 = \left( \frac{\sum_{i=1}^{5 \cdot 10^{25}} l_i}{5 \cdot 10^{25}} \right) = l = 3,12 \text{ м.}$$

Любой исследователь и читатель может проверить истинность третьего закона теплового излучения цилиндрических газовых объемов, вписав в каждый из цилиндрических газовых объемов  $F1-F3$ , например, по 100 или более сфер и определив с помощью простой программы «Компас» на компьютере среднearифметическое расстояние от центров сфер каждого из трех цилиндрических газовых объемов до расчетной площадки  $F2$  (см. рисунок): оно равно во всех трех случаях 3,12 м.

### **ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ИСТИННОСТИ ВТОРОГО, ЧЕТВЕРТОГО ЗАКОНОВ КВАНТОВОГО ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ**

Согласно второму и четвертому законам Макарова, локальные угловые коэффициенты, плотности потоков излучений коаксиальных цилиндрических газовых объемов  $F, F1-F4$  на расчетную площадку  $F2$  равны [16]

$$\begin{aligned}\varphi_{F1F2} &= \varphi_{F2F2} = \varphi_{F3F2} = \varphi_{F4F2}; \\ q_{F1F2} &= q_{F2F2} = q_{F3F2} = q_{F4F2}.\end{aligned}\quad (4)$$

Результат (см. выражение (4)) получим, выполняя расчеты по формуле (3) и принимая, что в коаксиальном цилиндрическом газовом объеме малого диаметра расположено  $5 \cdot 10^{25}$  атомов.

Рассчитаем локальные угловые коэффициенты излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов  $F1-F3$   $\varphi_{F1F2}-\varphi_{F3F2}$  на расчетную площадку  $F2$  (см. рисунок) при исходных расчетных, принятых в примере (см. рисунок), а также локальные угловые коэффициенты излучения цилиндрического газового объема  $F4$   $\varphi_{F4F2}$  бесконечно малого диаметра на расчетную площадку  $F2$  по выведенным аналитическим путем универсальным расчетным формулам [2]:

$$\begin{aligned}\varphi_{F1F2} &= \varphi_{F2F2} = \varphi_{F3F2} = \varphi_{F4F2} = \frac{F_2}{2 \cdot \pi^2 \cdot r \cdot h} [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 - \beta_2)] = \\ &= \frac{0,25}{2 \cdot 3,14^2 \cdot 3 \cdot 3} \left[ \frac{52}{57} + \sin 52^\circ \cos 0^\circ \right] = 0,00215\end{aligned}$$

Любой исследователь и инженер может проверить истинность второго закона теплового излучения цилиндрических газовых объемов, используя формулы для расчета угловых коэффициентов излучения полых цилиндров на расчетную площадку, изложенные в справочниках А.Г. Блоха [1], Р. Зигеля, Дж. Хауэлла [9], и получить по этим формулам для цилиндрических газовых объемов  $F1-F4$  результат:

$$\varphi_{F1F2} = \varphi_{F2F2} = \varphi_{F3F2} = \varphi_{F4F2} = 0,00215$$

Следовательно, угловые коэффициенты излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов на расчетную площадку равны.

Рассчитаем плотность потоков теплового излучения, падающих от цилиндрических газовых объемов  $F1-F4$ , на расчетную площадку  $F2$  по первому закону (выражению (1)):

$$\begin{aligned}q_{F1F2} &= q_{F2F2} = q_{F3F2} = q_{F4F2} = \frac{\varphi_{F1F2} \cdot P_{F1}}{F2 \cdot e^{kl}} = \frac{\varphi_{F2F2} \cdot P_{F2}}{F2 \cdot e^{kl}} = \\ &= \frac{\varphi_{F3F3} \cdot P_{F2}}{F2 \cdot e^{kl}} = \frac{\varphi_{F4F3} \cdot P_{F2}}{F2 \cdot e^{kl}} = \frac{0,00215 \cdot 14 \cdot 10^3}{0,25 \cdot e^{0,162 \cdot 3 \cdot 12}} = 73,4 \text{ кВт/м}^2.\end{aligned}$$

Поскольку для цилиндрических газовых объемов  $F1-F4$  равны их средние длины пути лучей от излучающих атомов до расчетной площадки  $F2$ , коэффициенты поглощения газовой среды, выделяющиеся в объемах  $F1-F4$  мощности излучения, локальные угловые коэффициенты излучения объемов  $F1-F4$  на площадку  $F2$ , следовательно, равны и плотности потоков теплового излучения объемов  $F1-F4$  на расчетную площадку  $F2$ .

### **ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ИСТИННОСТИ ПЯТОГО ЗАКОНА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ**

Согласно пятому закону, плотность потока излучения центрального цилиндрического газового объема малого диаметра на расчетную площадку  $q_{F4F2}$  равна сумме плотностей потоков излучений всех коаксиальных цилиндрических газовых объемов на расчетную площадку при мощности излучения, выделяющейся в объеме малого диаметра, равной сумме мощностей излучений, выделяющихся во всех коаксиальных цилиндрических газовых объемах, излучающих на расчетную площадку [16]:

$$q_{F4F2} = \sum_{i=1}^3 q_{FiF2}.$$

Действительно, подставив в формулу (1) параметры излучающих коаксиальных цилиндрических газовых объемов  $F1-F4$  и рассчитав их плотности потоков излучений на расчетную площадку, получим

$$q_{F1F2} = q_{F2F2} = q_{F3F2} = 73,4 + 73,4 + 73,4 + \frac{0,00215 \cdot 42 \cdot 10^3}{0,25 \cdot e^{0,162 \cdot 3,12}} = 220,2 \text{ кВт/м}^2.$$

Из пятого закона теплового излучения газовых объемов следует, что тепловое излучение цилиндрического газового объема большого диаметра можно в расчетах заменить излучением цилиндрического газового объема малого диаметра. Физическая природа этого уникального явления, данного закона следующая: допустим, радиальными усилиями, направленными по всей высоте цилиндрического газового объема большого диаметра от периферии объема к центру (к оси симметрии), сконцентрируем все  $15 \cdot 10^{25}$  атомов, составляющих большой газовый объем, на оси симметрии объема. В этом случае мощность излучения цилиндрического газового объема сосредоточится в цилиндрическом объеме малого диаметра и его излучение будет эквивалентно излучению всех атомов цилиндрического газового объема большого диаметра. При расчете плотности теплового излучения оси симметрии газового объема на расчетную площадку принимается, что коэффициент поглощения газовой среды, через которую проходит тепловое излучение оси симметрии газового объема, равен коэффициенту поглощения газовой среды цилиндрического газового объема большого диаметра.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Из законов теплового излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов следует, что излучение любого цилиндрического газового объема большой мощности и большого диаметра может быть эквивалентно заменено равным по мощности излучением коаксиального цилиндрического газового объема малого диаметра. Законы теплового излучения цилиндрических газовых объемов освобождают исследователей от интегрирования по объему при расчетах теплообмена излучением и позволяют определять параметры излучения путем однократного интегрирования тригонометрических зависи-

мостей (см. формулу (2)) коаксиального цилиндрического объема малого диаметра. В [2] приведены результаты однократного интегрирования по высоте для выражения (2) при любом пространственном положении цилиндрического газового объема малого диаметра и поверхности нагрева  $F_2$ .

Открытые законы теплового излучения цилиндрических газовых объемов являются основой разработанной автором теории теплообмена в электродуговых сталеплавильных и факельных печах, топках, КС. По пропорции и в зависимости от температур и объемов зон факела определяются мощности излучения цилиндрических газовых объемов. Далее по законам-формулам (1), (3), а также по формулам для расчета угловых коэффициентов излучения цилиндрических газовых объемов при любом произвольном пространственном расположении электрической дуги, факела и расчетной площадки, выведенным и изложенным в [2], находятся потоки теплового излучения на поверхности нагрева в электродуговых сталеплавильных и факельных печах, топках, КС.

Законы теплового излучения газовых объемов аналогично фундаментальным законам физики обладают мультидисциплинарностью, компактностью, точностью описания физического явления. Например, фундаментальный закон физики – закон Ома, являющийся одним из трех законов, на которых построены расчеты всех устройств электрификации, – характеризует соотношение между током  $I$ , протекающим в проводнике, напряжением  $U$ , приложенным к проводнику, и сопротивлением проводника  $R$ :

$$I = \frac{U}{R}.$$

Аналогично закону Ома закон теплового излучения газовых объемов (см. формулу (1)) описывает зависимость плотности потока теплового излучения  $q$  газового объема от углового коэффициента излучения  $\varphi$ , мощности излучения  $P$ , средней длины пути лучей  $l$ , коэффициента поглощения  $k$  газового объема. Для расчета параметров теплового излучения газовых объемов (см. (1))  $\varphi$ ,  $P$ ,  $l$  автором выведены аналитические выражения, формулы.

Впервые в мировой научной практике в хаосе теплового излучения септиллионов атомов факела, электрической дуги была найдена гармония, порядок, определяемые законами теплового излучения ионизированных и неионизированных газовых объемов, или законами Макарова. Использование предложенных законов теплового излучения газовых объемов позволяет рассчитать рациональные тепловые режимы работы электродуговых сталеплавильных и факельных печей, топков, КС ГТУ, ГТД, ЖРД, увеличить ресурс их работы, снизить на миллион киловатт-час расход электроэнергии в электродуговых сталеплавильных печах и на миллион тонн расход топлива в факельных печах, топках, КС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров А.Н. Закономерная связь между параметрами излучения изотермических коаксиальных цилиндрических газовых слоев, образующихся апм атмосферном давлении (закономерности Макарова): диплом на научное открытие № 417, выдан 12.09.2011 Международной академией авторов научных открытий и изобретений, Москва.
2. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань. 2014. 384 с.

3. Блох А.Г. Тепловое излучение в котельных установках. Л.: Энергия. 1967. 326 с.
4. Makarov A.N. Radiation from Large Gas Volumes and Heat Exchange in Steam Boiler Furnaces // *Power Technology and Engineering*. 2019. № 3. P. 196–201.
5. Makarov A.N. Flare Temperature and Nitrogen Oxide Emission Reduction and Heat Transfer in the TGMP-314I Steam Boiler Firebox // *Power Technology and Engineering*. 2016. № 2. P. 200–203.
6. Makarov A.N., Okuneva V.V., Galicheva M.K. Influence of the Length of a Torch Tongue on Heat Flow in a Burner Device // *Power Technology and Engineering*. 2017. № 4. P. 445–450.
7. Мастрюков Б.С. Теплотехнические расчеты промышленных печей: учебник. М.: Металлургия. 1972. 368 с.
8. Адрианов В.Н. Основы радиационного и сложного теплообмена. М.: Энергия. 1972. 463 с.
9. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир. 1975. 934 с.
10. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. Л.: Энергия. 1971. 294 с.
11. Глинков М.А., Глинков Г.М. Общая теория печей. М.: Металлургия. 1978. 264 с.
12. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Тепломассоперенос. М.: Металлургия. 1995. 400 с.
13. Makarov A.N. Laws of Heat Radiation from Sunrtgees and Gas Volumes // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2015. № 3. P. 260–270.
14. Makarov A.N. Calculations of Heat Transfer in Torch Furnaces by Gas Volume Radiation Laws // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2016. № 4. P. 488–503.
15. Makarov A.N. Fundamental Laws of Physics and Calculation of Heat Transfer in Combustion Chambers of Gas-Turbine Plants // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2017. № 5. P. 358–375.
16. 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 электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.ru](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.ru)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Проверка на соответствие истине законов теплового излучения газовых объемов. Часть I. Примеры расчетов по законам теплового излучения цилиндрических газовых объемов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 4 (20). С. 58–66.

**VERIFICATION FOR THE CORRESPONDENCE  
TO THE TRUTH OF THE LAWS  
OF THERMAL RADIATION  
OF GAS VOLUMES. PART I. EXAMPLES OF CALCULATIONS  
ACCORDING TO THE LAWS OF QUANTUM THERMAL RADIATION  
OF CYLINDRICAL GAS VOLUMES**

*A.N. Makarov*

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** Examples of calculations of heat exchange of gas volumes with heating surfaces according to the laws of thermal radiation of cylindrical gas volumes are given. Examples of calculations confirm the validity of the five laws of thermal radiation of gaseous volumes of electric arcs and torches. Researchers and readers are invited to check the truth of the laws of quantum thermal radiation of gas volumes on a computer using the Compass program.

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

**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. Verification for the correspondence to the truth of the laws of thermal radiation of gas volumes. Part I. Examples of calculations according to the laws of thermal radiation of cylindrical gas volumes // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 58–66.

**УДК 44.31.03:45.43.00:53.07.00**

**ПРОВЕРКА НА СООТВЕТСВИЕ ИСТИНЕ  
ЗАКОНОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ.  
ЧАСТЬ II. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ПО ЗАКОНАМ  
ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ  
И СФЕРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ**

*А.Н. Макаров*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., 2023

**Аннотация.** Приведены примеры расчетов теплообмена газовых объемов электрических дуг и факелов с поверхностями нагрева по законам теплового излучения цилиндрических и сферических газовых объемов. Отмечено, что примеры расчетов

подтверждают истинность пяти законов теплового излучения газовых объемов. Указано, что газовый объем в топке парового котла заполняет всю топку и имеет форму прямоугольного параллелепипеда; при моделировании излучения газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда излучением цилиндрического газового объема погрешность расчетов не превышает 3 %. Сделан вывод, что погрешность в расчетах при моделировании излучения газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда излучением вписанных в параллелепипед нескольких сотен сферических газовых объемов составляет 0,9–0,4 %.

**Ключевые слова:** тепловое излучение, газовый объем, законы, факел, электрическая дуга, печи, топки, камеры сгорания.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-66-76**

### ***ВВЕДЕНИЕ***

Открытые законы теплового излучения изохорных изотермических концентрических сферических и коаксиальных цилиндрических газовых объемов [1] позволяют исследователям, конструкторам рассчитать тепловые потоки, среднюю длину пути лучей, угловые коэффициенты излучения газовых объемов любой сложной объемной формы, вписывая в них сферические объемы вплоть до сферических объемов атомов.

В зависимости от сложности формы в газовые объемы могут быть вставлены десятки, сотни и миллионы сфер большого, среднего, малого или бесконечно малого диаметра. Концентрическими сферическими совместно с коаксиальными цилиндрическими газовыми объемами можно заполнить излучающие газовые объемы любой сложной объемной формы без остатка и рассчитать тепловое излучение газовых объемов на поверхности нагрева с высокой точностью [1–3].

Объемная расчетная модель атома представляет собой ядро в виде сферического объема и вращающихся по концентричным с ядром сферическим орбитам электронов. Поэтому сферическими газовыми объемами малого и бесконечно малого диаметра можно заполнить газовые объемы, факелы любой сложной формы и найти их тепловое излучение с высокой точностью. Газовый объем, образующийся при сгорании топлива в топке парового котла, заполняет всю топку и имеет форму прямоугольного параллелепипеда [4–12].

Выполним моделирование излучения части объема факела, представляющего изотермический объем в форме прямоугольного параллелепипеда, сферическими и цилиндрическими газовыми объемами.

### ***МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВОГО ОБЪЕМА ТОПОК ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ И СФЕРИЧЕСКИМИ ГАЗОВЫМИ ОБЪЕМАМИ***

Рассмотрим излучение части объема факела, представляющего изотермический газовый объем  $l$  в форме прямоугольного параллелепипеда с размером  $a \times b \times h = 3 \times 3 \times 3$  м на расчетную площадку  $dF$  площадью  $F = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25$  м<sup>2</sup> (рис. 1).

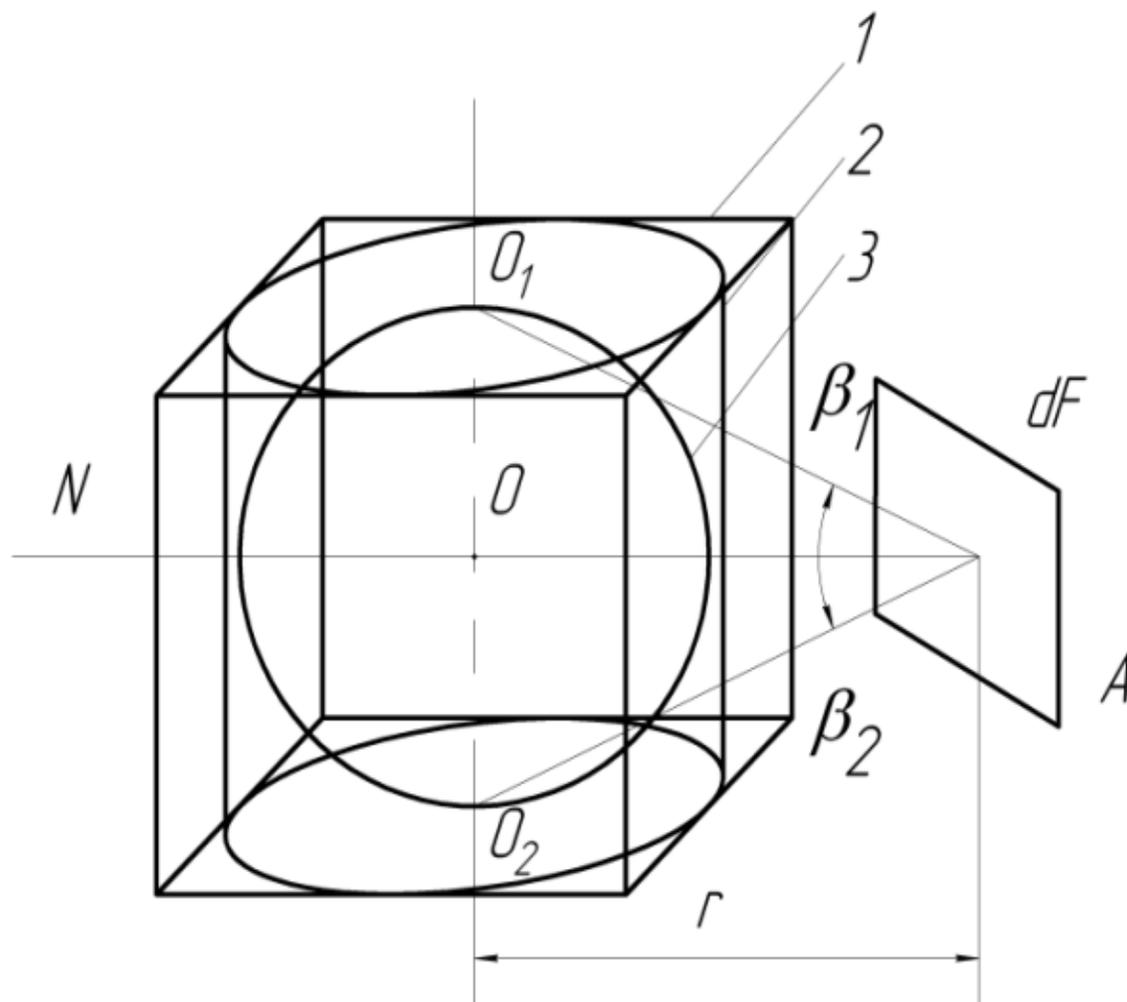


Рис. 1. Моделирование теплового излучения газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда излучением цилиндрического и сферического объемов:

$$\angle O_1AO = \beta_1, \angle O_2AO = \beta_2, \beta_1 + \beta_2 = \beta$$

Впишем в прямоугольный параллелепипед 1 цилиндрический газовый объем 2, диаметром 3 м, высотой  $l_2=3$  м и сферический газовый объем 3 диаметром 3 м. В каждом из газовых объемов одновременно излучают кванты тепла  $15 \cdot 10^{25}$  атомов, равномерно заполняющих объемы. Перпендикуляр  $N$  в центр  $A$  площадки  $dF$  проходит через центр симметрии  $O$  объема 3 и ось симметрии цилиндрического газового объема 2 и делит ось симметрии  $O_1O_2$  прямоугольного параллелепипеда 1 и цилиндра пополам между их верхним и нижним основаниями. Расстояние между точкой  $O$  и центром симметрии площадки  $dF = 3$  м. В каждом из излучающих газовых объемов выделяется равная мощность излучения:  $P_1 = P_2 = P_3 = 42$  МВт; коэффициент поглощения газовой среды принят  $\kappa = 0,162$  [1].

Плотность падающего на расчетную площадку  $dF$  потока теплового излучения от излучающего цилиндрического газового объема 2 определяется по первому закону теплового излучения газовых объемов [1–3]:

$$q_{2dF} = \varphi_{2dF} P_2 F^{-1} e^{-kl_2} = \frac{FP_2 e^{-kl_2}}{F 2\pi^2 l_0} \left[ \beta + \sin \beta \cos(\beta_1 - \beta_2) \right] =$$

$$\frac{0,25 \cdot 42 \cdot 10^3 \cdot e^{-0,162 \cdot 3,11}}{0,25 \cdot 2 \cdot 3,14^2 \cdot 3 \cdot 3} \cdot \left[ \frac{52}{57} + \sin 52^\circ \cos 0^\circ \right] = 217,1 \text{ кВт/м}^2.$$

(1)

Согласно первому закону теплового излучения газовых объемов выполнен расчет плотности падающего на расчетную площадку  $dF$  потока теплового излучения от сферического газового объема:

$$q_{3dF} = \varphi_{3dF} P_3 F^{-1} e^{-kl_3} = \frac{0,0022 \cdot 42 \cdot 10^3 \cdot e^{-0,162 \cdot 3}}{0,25} = 228,3 \text{ кВт/м}^2.$$

(2)

В процессе расчетов плотностей, падающих на расчетную площадку  $dF$  потоков тепловых излучений от цилиндрического и сферического газовых объемов, получили результаты, отличающиеся не более чем на 5 %. Отличие  $\Delta$  в результатах расчетов определяем по выражению

$$\Delta = \left( 1 - \frac{q_{2dF}}{q_{3dF}} \right) \cdot 100 = \left( 1 - \frac{217,1}{228,3} \right) \cdot 100 = 4,9 \%$$

Точность расчета плотности, падающего на расчетную площадку  $dF$  потока теплового излучения от газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда, можно повысить, если вписать в него несколько десятков сферических газовых объемов.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ СФЕРИЧЕСКИМИ ГАЗОВЫМИ ОБЪЕМАМИ МЕНЬШЕГО ДИАМЕТРА**

Впишем равномерно в газовый объем в форме прямоугольного параллелепипеда сферические газовые объемы с диаметром 0,5 м, а именно по высоте параллелепипеда 6 рядов сфер по 36 в каждом, всего 216 сфер (рис. 2).

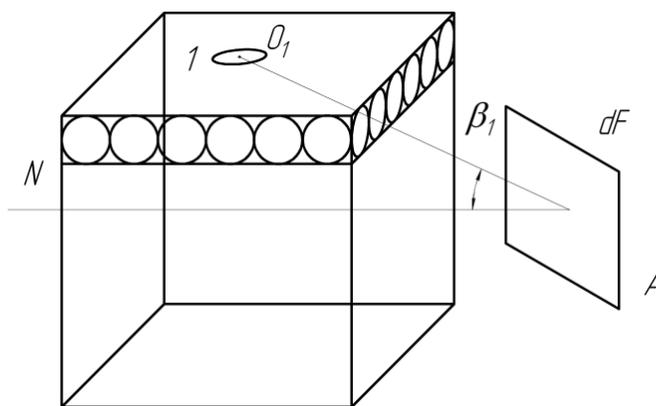


Рис. 2. Моделирование теплового излучения газового объема  
216 сферическими газовыми объемами

В каждом из 216 сферических объемов выделяется равная мощность излучения:

$$P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_{216} = 42 \cdot 10^3 / 216 = 194,4 \text{ кВт.}$$

В [2] выведено обобщенное аналитическое выражение для расчета элементарного углового коэффициента излучения сферы малого диаметра на любую расчетную площадку, произвольно расположенную в пространстве. Например, формула для расчета элементарного углового коэффициента излучения сферического газового объема 1, расположенного в центре верхнего ряда вписанных в параллелепипед сфер на площадку (см. рис. 2), имеет вид [2]

$$\varphi_{1dF} = \frac{F \cos \beta_1}{4\pi l^2}, \quad (3)$$

где  $\angle OAN = \beta_1$  – угол между перпендикуляром  $NA$  к площадке  $dF$  и лучом  $OA$ , соединяющим центры площадки и объема 1 ( $AO = l$  – расстояние между центрами площадки  $dF$  и объема 1);  $F$  – площадь площадки  $dF$ .

Поскольку согласно второму закону теплового излучения локальные угловые коэффициенты излучения концентричных сферических газовых объемов равны, по выражению (3) можно рассчитать угловые коэффициенты излучения на расчетную площадку сферических источников излучения как бесконечно малого диаметра, так и гигантских размеров, например небесных светил, звезд. В будущем, во время дальних космических полетов, будет важно знать, на какое расстояние корабль может приблизиться к звезде без опасности термического разрушения. Открытые законы позволяют определить тепловые потоки, падающие на корпус корабля от звезды при любом расстоянии до нее и любом пространственном положении летательного аппарата [13–15].

Найдем локальный угловой коэффициент излучения сферического газового объема 1 на расчетную площадку  $dF$  (см. рис. 2):

$$\varphi_{1dF} = \frac{F \cos \beta_1}{4\pi l_1^2} = \frac{0,25 \cdot \cos 18^\circ}{4 \cdot 3,14 \cdot 3,2^2} = 0,0018.$$

Плотность потока теплового излучения, падающего на расчетную площадку  $dF$  от сферического газового объема 1, определяем по выражению

$$q_{1dF} = \varphi_{3dF} \rho_1 F^{-1} e^{-kl_1} = \frac{0,0018 \cdot 194,4}{0,25 \cdot e^{0,162 \cdot 3,2}} = 0,833 \text{ кВт/м}^2.$$

Аналогичным образом рассчитываем плотности падающих на расчетную площадку  $dF$  потоков тепловых излучений от каждого из 216 сферических газовых объемов, заполняющих прямоугольный параллелепипед. Для автоматизации расчетов используем программу расчета угловых коэффициентов излучений и плотностей потоков излучений на компьютере. Итоговая плотность потоков излучений  $q_{\Sigma 216}$ , падающих от 216 сферических газовых объемов на площадку  $dF$ , определяется суммированием плотностей потоков излучений от 216 сферических газовых объемов:

$$q_{\Sigma 216} = \sum_{i=1}^{216} q_{idF} = 212,2 \text{ кВт/м}^2. \quad (4)$$

Сравним результаты моделирования теплового излучения газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда цилиндрическим (см. выражение (1)), сферическим (см. формулу (2)) газовыми объемами и 216 сферическими газовыми объемами (см. выражение (4)). Наиболее точный результат получен по выражению (4), так как вписанные сферические газовые объемы в количестве 216 шт. наиболее эффективно заполняют объем

прямоугольного параллелепипеда. Результаты расчета теплового излучения газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда цилиндрическим газовым объемом обладают погрешностью  $\Delta_{\text{ц}}$  не более 3 %:

$$\Delta_{\text{ц}} = (1 - 212,2 / 217,1) \cdot 100 = 2,3 \%$$

Результаты моделирования газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда одним сферическим газовым объемом имеют погрешность

$$\Delta_1 = (1 - 212,2 / 228,3) \cdot 100 = 7,1 \%$$

Таким образом, тепловое излучение газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда можно моделировать излучением вписанного в него цилиндрического газового объема, так как погрешность расчетов не превышает 3 %. Тепловое излучение газового объема в форме указанного параллелепипеда не рекомендуется моделировать вписанным в него одним сферическим газовым объемом, так как погрешность расчетов превышает 7 %. Наименьшая погрешность в результатах расчетов от действительного значения плотности потока теплового излучения газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда на расчетную площадку достигается при моделировании излучения параллелепипеда вписанными в него несколькими десятками сферических газовых объемов. Увеличивать число вписываемых в прямоугольный параллелепипед сферических газовых объемов до нескольких сотен или тысяч сфер нецелесообразно, так как при этом растет количество вычислительных операций, а точность расчетов по сравнению с действительным значением потоков излучений – на десятые доли процента, а именно на 0,1–0,8 %. Вышесказанное подтверждают расчеты, данные ниже.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ**

#### **МНОЖЕСТВОМ СФЕРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ**

Впишем в газовый объем в форме прямоугольного параллелепипеда 15 сферических газовых объемов с диаметром 1 м каждый, в три ряда (I–III) по высоте и по 5 сферических газовых объемов в каждом ряду (рис. 3).

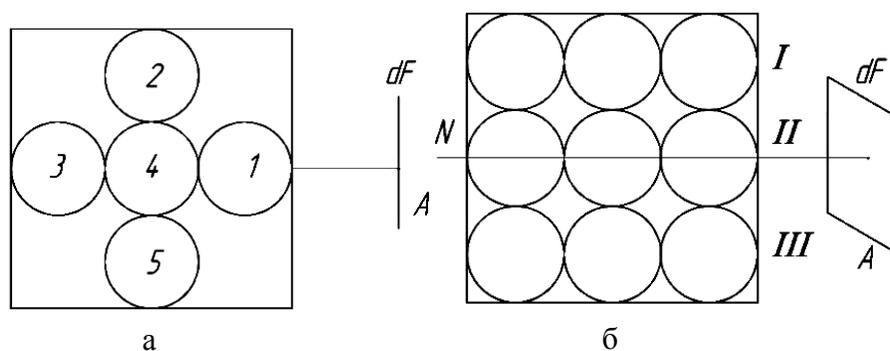


Рис. 3. Моделирование теплового излучения газового объема 15 сферическими газовыми объемами: вид сверху (а) и спереди (б); 1–5 – сферические газовые объемы первого ряда

В каждом из 15 сферических газовых объемов выделяется равная мощность излучения, а именно  $P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_{15} = 42 \cdot 10^3 / 15 = 2,8$  МВт.

Рассчитаем плотности падающих на расчетную площадку  $dF$  потоков тепловых излучений от сферических газовых объемов 1–3 (см. рис.3):

$$q_{1dF} = \frac{P_1 \cos \beta_1}{4\pi l_1^2} e^{-ki_1} = \frac{2,8 \cdot 10^3 \cdot \cos 27^\circ}{4 \cdot 3,14 \cdot 2,2^2} e^{-0,162 \cdot 2,2} = 28,7 \text{ кВт/м}^2;$$

$$q_{2dF} = \frac{P_2 \cos \beta_2}{4\pi l_2^2} e^{-ki_2} = \frac{2,8 \cdot 10^3 \cdot \cos 40^\circ}{4 \cdot 3,14 \cdot 3,8^2} e^{-0,162 \cdot 3,8} = 6,4 \text{ кВт/м}^2;$$

$$q_{3dF} = \frac{P_3 \cos \beta_3}{4\pi l_3^2} e^{-ki_3} = \frac{2,8 \cdot 10^3 \cdot \cos 14^\circ}{4 \cdot 3,14 \cdot 4,2^2} e^{-0,162 \cdot 4,2} = 6,22 \text{ кВт/м}^2.$$

Аналогичным образом определяем плотности падающих на расчетную площадку  $dF$  потоков тепловых излучений от 4–15 сферических газовых объемов. Находим суммарную плотность потока излучений 1–15 указанных объемов на площадку  $dF$ :

$$q_{\Sigma 15} = \sum_{i=1}^{15} q_{idF} = 207,5 \text{ кВт/м}^2.$$

Рассчитаем погрешность вычислений при моделировании теплового излучения газового объема в форме прямоугольного параллелепипеда 15 сферическими газовыми объемами:

$$\Delta_{15} = (1 - 207,5 / 212,2) \cdot 100 = 2,2 \text{ \%}.$$

Аналогичным образом моделируем тепловое излучение прямоугольного параллелепипеда 108 и 432 сферическими газовыми объемами. В результате расчетов получили следующие значения суммарных плотностей потоков излучений сферических газовых объемов на расчетную площадку  $dF$ :

$$q_{\Sigma 108} = \sum_{i=1}^{108} q_{idF} = 210,3 \text{ кВт/м}^2;$$

$$q_{\Sigma 432} = \sum_{i=1}^{432} q_{idF} = 213,1 \text{ кВт/м}^2.$$

Погрешность вычислений при моделировании теплового излучения газовых объемов в форме параллелепипеда 108 и 432 сферическими газовыми объемами составляет  $\Delta_{108} = (1 - 210,3 / 212,2) \cdot 100 = 0,9 \text{ \%}$  и  $\Delta_{432} = (1 - 212,2 / 213,1) \cdot 100 = 0,4 \text{ \%}$  соответственно.

Таким образом, погрешность вычислений при моделировании теплового излучения газового объема в форме параллелепипеда одним цилиндрическим газовым объемом равна 2,3 %, одним сферическим газовым объемом – 7,1 %, 15 сферическими газовыми объемами – 2,2 %, 108 сферическими газовыми объемами – 0,9 %, 432 сферическими газовыми объемами – 0,4 %. Отсюда следует, что газовый объем в форме параллелепипеда можно моделировать одним цилиндрическим газовым объемом, а также одной-двумя сотнями сферических газовых объемов и получать результат расчетов, обладающий высокой точностью.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Топки паровых котлов электростанций часто представляют собой геометрические тела в виде прямоугольных параллелепипедов, поэтому, вписывая в топки цилиндрические газовые объемы, можно выполнить расчеты теплообмена с погрешностью, не превышающей 3–5 %. Факельные нагревательные печи также являются геометрическими

телами в виде прямоугольных параллелепипедов. В факелы, выступающие источниками энергии в печах и представляющие собой эллипсоиды вращения, вписываем при проведении расчетов цилиндрические газовые объемы. Продукты горения заполняют печь в виде прямоугольного параллелепипеда, в который вписываем цилиндрические газовые объемы и определяем тепловые потоки от продуктов горения. При этом, как показали вышеприведенные аналитические исследования, погрешность расчетов не превышает 3–5 %. Электрические дуги в электродуговых сталеплавильных печах представляют собой ионизированные газовые объемы в форме усеченных конусов, в которые вписываем цилиндрические газовые объемы и осуществляем расчеты теплообмена электрических дуг с поверхностями нагрева с высокой точностью.

Факел в камерах сгорания газотурбинных установок (ГТУ), газотурбинных двигателей (ГТД), жидкостных реактивных двигателей (ЖРД) имеет сложную форму, которая зависит от количества горелок, завихрителей, организации движения воздуха, топлива, продуктов горения [2]. В камере имеется несколько активных зон горения топлива, факелов сложной геометрической формы. Расчет потоков тепловых излучений факелов на жаровую трубу, горелки, завихрители – сложная научная задача. Обычно информацию о потоках тепловых излучений факелов на поверхности нагрева камеры сгорания получают в результате долгих (длящихся многие месяцы) дорогостоящих испытаний указанной камеры на испытательных стендах. Научное открытие законов излучения газовых объемов позволяет моделировать тепловое излучение факелов камер сгорания ГТУ, ГТД, ЖРД цилиндрическими и сферическими газовыми объемами. Математическое моделирование дает возможность рассчитать потоки нагрева и охлаждения камеры сгорания, на стадии конструирования организовать рациональный теплообмен в камере, уменьшить сроки создания и испытаний и затраты на создание и проведение испытаний камеры на стендах [1–3].

Моделирование факела топок паровых котлов цилиндрическими газовыми объемами позволяет найти распределение плотности потоков излучений по периметру стен топок, ранжировать экранные поверхности топок по количеству полученного тепла и выявить наиболее напряженные участки для определения регламента ремонтных работ, реконструировать топку с целью повышения их коэффициента полезного действия [1–3].

За последнее столетие использование конструкторами законов излучения твердых тел, законов Стефана – Больцмана, Планка, Вина при конструировании твердотопливных топок в конце XX столетия дало возможность увеличить коэффициент полезного использования энергии топлива в этих установках с 25–30 % в начале XX столетия до 70–90 % в конце указанного столетия. Аналогичные процессы ожидаются в XXI века с использованием при конструировании факельных печей законов теплового излучения газовых объемов. В настоящее время коэффициент полезного использования энергии топлива в факельных печах составляет 25–45 %. Применение при конструировании и расчетах законов излучения газовых объемов дает возможность увеличить коэффициент полезного использования энергии топлива в факельных печах с 25–45 до 55–65 %, сэкономить миллионы тонн топлива.

Впервые в мировой научной практике в хаотичном тепловом излучении множества атомов, сопровождающих факельное сжигание топлива, выявлены законы, организующие порядок в хаосе, позволяющие рассчитать теплообмен и учитывать излучение всех атомов вместе и каждого атома в отдельности на расчетные площадки в печах, топках, камерах сгорания.

Все фундаментальные законы физики (законы Ньютона, Гука, Фурье, Ома и др.) имеют относительно простое написание, в них мало расчетных параметров, но именно в этом состоят их фундаментальность, всеобщность и всеохватность, мультидисциплинарность, точность описания явлений природы. Как и во всех фундаментальных законах физики, в законах теплового излучения газовых объемов есть все необходимое для расчета, они относительно просты. Законы теплового излучения газовых объемов компактны, несложны, используются для обучения студентов университетов, сотрудниками металлургических компаний для расчета рациональных энергетических режимов работы дуговых сталеплавильных печей [1–3]. На открытие законов теплового излучения газовых объемов, разработку теории теплообмена излучением автор потратил более 30 лет интенсивного творческого научного труда. Диплом о научном открытии законов теплового излучения газовых объемов автор получил в 2011 году после 35 лет научных изысканий и подтверждения законов и всех теоретических данных, экспериментальными исследованиями в печах, топках, камерах сгорания. Фундаментальные законы физики, в том числе законы теплового излучения газовых объемов, подтверждают известную истину: «Все необходимое – просто, все сложное не нужно». Российская металлургия сократила за последние 20 лет электропотребление в дуговых сталеплавильных печах на 28–30 %. Определенная заслуга в этом, наряду с персоналом металлургических компаний, научно-педагогическим составом металлургических кафедр, принадлежит автору научного открытия. Признанием этого факта является награждение автора научного открытия и его учебника [1], в котором изложены открытые законы и разработанная на их основе теория теплообмена в дуговых сталеплавильных и факельных печах, топках, камерах сгорания, серебряной медалью международной выставки «Металл-Экспо 2018» в номинации «Лучшее издание в металлургической промышленности». Золотую медаль получил научно-педагогический состав НИТУ МИСИС. В выставке приняли участие 550 российских и иностранных компаний, ряд руководителей российских компаний входили в наградной комитет. За разработку инновационных электродуговых и факельных печей, топков, камер сгорания автор научного открытия награжден серебряной медалью международной выставки изобретений EXPROPRIOTY 2013.

#### 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. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установках. М. – Вологда: Инфра-Инженерия. 2022. 452 с.
3. Макаров А.Н. Методология научных исследований в университетах и промышленных компаниях. М. – Вологда: Инфра-Инженерия. 2023. 276 с.
4. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат. 1991. 432 с.
5. Блох А.Г. Тепловое излучение в котельных установках. Л.: Энергия. 1967. 326 с.
6. Makarov A.N., Okuneva V.V., Galicheva M.K. Influence of the Length of a Torch Tongue on Heat Flow in a Burner Device // *Power Technology and Engineering*. 2017. № 4. P. 445–450.
7. Мастрюков Б.С. Теплотехнические расчеты промышленных печей: учебник. М.: Металлургия. 1972. 368 с.

8. Адрианов В.Н. Основы радиационного и сложного теплообмена. М.: Энергия, 1972. 463 с.
9. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир. 1975. 934 с.
10. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. Л.: Энергия. 1971. 294 с.
11. Глинков М.А., Глинков Г.М. Общая теория печей. М.: Metallurgy. 1978. 264 с.
12. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Тепломассоперенос. М.: Metallurgy. 1995. 400 с.
13. Makarov A.N. Laws of Heat Radiation from Sunrtgees and Gas Volumes // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2015. № 3. P. 260–270.
14. Makarov A.N. Calculations of Heat Transfer in Torch Furnaces by Gas Volume Radiation Laws // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2016. № 4. P. 488–503.
15. Makarov A.N. Fundamental Laws of Physics and Calculation of Heat Transfer in Combustion Chambers of Gas-Turbine Plants // *Word Journal of Engineering and Technology*. 2017. № 5. P. 358–375.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Проверка на соответствие истине законов теплового излучения газовых объемов. Часть II. Примеры расчетов по законам теплового излучения цилиндрических и сферических газовых объемов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 4 (20). С. 66–76.

---

### CHECKING THE LAWS OF THERMAL RADIATION OF GAS VOLUMES FOR THE CORRESPONDENCE TO THE TRUTH. PART II. EXAMPLES OF CALCULATIONS ACCORDING TO THE LAWS OF THERMAL RADIATION OF CYLINDRICAL AND SPHERICAL GAS VOLUMES

*A.N. Makarov*

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** Examples of calculations of heat transfer of gas volumes of electric arcs and torches with heating surfaces according to the laws of thermal radiation of cylindrical and spherical gas volumes are given. It is noted that the examples of calculations confirm the truth of the five laws of thermal radiation of gas volumes. It is indicated that the gas volume in the furnace of a steam boiler fills the entire furnace and has the shape of a rectangular parallelepiped; when modeling the radiation of a gas volume in the form of a rectangular parallelepiped by radiation of a cylindrical gas volume, the calculation error does not exceed 3 %. It is concluded that the error in calculations when modeling the radiation of a gas volume in the form of a rectangular parallelepiped by the radiation of several hundred spherical gas volumes inscribed in a parallelepiped is 0,9–0,4 %.

**Keywords:** thermal radiation, gas volume, laws, torch, electric arc, furnaces, furnaces, combustion chambers.

#### 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. Checking the laws of thermal radiation of gas volumes for the correspondence to the truth. Part II. Examples of calculations according to the laws of thermal radiation of cylindrical and spherical gas volumes // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 66–76.

УДК 629.7.052

#### ТЕОРЕМА О ЦЕНТРЕ $n$ -СИММЕТРИИ ВЫПУКЛОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ТЕЛА

*Ал.А. Шум<sup>1</sup>, А.М. Ветошкин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Тверской государственной технической университет (г. Тверь, Тверская область)*

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

© Шум Ал.А., Ветошкин А.М., 2023

**Аннотация.** Рассмотрено 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). Доказана следующая теорема: в любой выпуклой области пространства можно определить функцию плотности так, что центр  $n$ -симметрии полученного тела будет находиться в любой наперед заданной внутренней точке этого тела (ранее были известны частные случаи этой теоремы, соответствующие значениям  $n = 0$  и  $n = 1$ ).

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

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-76-82

#### ВВЕДЕНИЕ

Существует большое количество методов и технологий механической и физико-технической обработки деталей машин (эти методы и технологии представлены в работах [1–13]). Чтобы правильно выбрать те или иные конкретные методы и технологии, в

каждом отдельном случае приходится учитывать характер распределения массы внутри обрабатываемой детали. Такое распределение особенно важно принимать во внимание в процессе изготовления и балансировки вращающихся деталей электрической машины, поскольку качество исполнения обозначенных деталей может непосредственно влиять на длительность безаварийной работы машины в целом.

Распределение массы внутри детали описывает соответствующая функция плотности. Плоская деталь (или в соответствии с определением из [16] *пластина*) может быть представлена как область плоскости вместе с определенной в этой области функцией плотности, зависящей от двух переменных, объемная (или, согласно определению из [28], *тело*) – как область пространства вместе с определенной в этой области функцией плотности, зависящей от трех переменных. Представляет некоторый интерес изучение тех или иных видов симметрии как плоских, так и объемных деталей. В работах [14–20, 25–27, 30] рассматривались вопросы симметрии плоских пластин, а в статьях [21–24, 28, 29] предметом изучения были вопросы симметрии пространственных тел.

В настоящей статье продолжается исследование симметрии пространственных тел. В статьях [21–24] рассматривались два вида симметрии указанных тел:  $s$ -симметрия и  $c$ -симметрия. В работе [28] было предложено общее определение  $n$ -симметрии пространственного тела, в рамках которого  $s$ -симметрия оказывается 0-симметрией (то есть частным случаем  $n$ -симметрии при значении  $n = 0$ ), а  $c$ -симметрия – 1-симметрией. В статье [24] для каждого из этих двух видов симметрии был установлен следующий факт: в любой выпуклой области пространства можно определить функцию плотности так, что центр соответствующей симметрии полученного пространственного тела будет находиться в любой наперед заданной внутренней точке этого тела. Теорема 1 из [24] устанавливает это для  $s$ -симметрии, а теорема 2 – для  $c$ -симметрии. В работе [29] был найден достаточный критерий совпадения центра  $n$ -симметрии выпуклого пространственного тела с началом координат, справедливый при любом значении  $n$ . В настоящей статье при помощи этого критерия переносятся утверждения теорем 1 и 2 из [24] 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 [30] для случая функции двух переменных.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБОСНОВАНИЯ**

Под *областью* понимается область трехмерного евклидова пространства, ограниченная некоторой поверхностью. Поверхность, ограничивающая область, называется *границей* этой области и также считается ее частью (таким образом, область является замкнутой). Точки области, не лежащие на ее границе, называются *внутренними* точками этой области. Область является *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 необходимым ограничением функции плотности – *подтелом* тела  $D$ .

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

Пусть в пространстве имеются плоскость  $\Pi$  и тело  $D$  с областью  $V$  и функцией плотности  $f(\rho, \varphi, \theta)$ . Тогда момент  $n$ -го порядка тела  $D$  относительно плоскости  $\Pi$  определяется следующим образом:

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

где  $R(\rho, \varphi, \theta)$  – расстояние от точки  $(\rho, \varphi, \theta)$  до плоскости  $\Pi$ .

Следует иметь в виду, 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  $\Pi$  представляют собой функции точки тела  $D$ .

Момент нулевого порядка тела  $D$  не зависит от положения плоскости  $\Pi$  и выражает собой массу 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  $\Pi$  представляет собой статический момент тела  $D$  относительно плоскости  $\Pi$ :

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

В соответствии с определением из статьи [28] плоскость является *плоскостью  $n$ -симметрии* тела  $D$ , если она делит тело  $D$  на два подтела –  $D_1$  и  $D_2$  – таким образом, что  $M_n(D_1) = M_n(D_2)$ . Точка представляет собой *центр  $n$ -симметрии* тела  $D$ , если всякая проведенная через нее плоскость является плоскостью  $n$ -симметрии тела  $D$ .

Вообще говоря, центра у  $n$ -симметрии тела  $D$  может не существовать. Так, в статье [23] рассмотрен пример тела, которое не имеет *центра полумасс*, то есть 0-симметрии (при этом центр 1-симметрии, то есть *центр масс*, всегда существует).

Предполагается, что переменные функции плотности  $f(\rho, \varphi, \theta)$   $\rho$ ,  $\varphi$  и  $\theta$  могут меняться в следующих пределах:  $0 \leq \rho < +\infty$ ,  $-\infty < \varphi < +\infty$ ,  $0 \leq \theta \leq \pi$ . Предполагается также, что эта функция имеет период  $2\pi$  по переменной  $\varphi$ , то есть  $f(\rho, \varphi, \theta) = f(\rho, \varphi + 2\pi, \theta)$  при любых значениях  $\rho$ ,  $\varphi$  и  $\theta$ , принадлежащих соответствующей области определения.

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

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

а это значит, что центро-симметричная функция имеет период  $2\pi$  по переменной  $\varphi$ .

В работе [29] доказана лемма, расположенная ниже и устанавливающая достаточный критерий совпадения центра  $n$ -симметрии выпуклого пространственного тела с началом координат.

**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  $\varphi$  и  $\theta$ , и функция этих углов  $F_n(\varphi, \theta) = \int_0^{r(\varphi, \theta)} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^{n+2} d\rho$  центрo-симметрична.

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

При помощи данного критерия может быть доказана следующая теорема, выступающая главным результатом настоящей работы.

**Теорема.** Для любой внутренней точки выпуклой области  $V$  можно так определить в области  $V$  функцию плотности  $f(\rho, \varphi, \theta)$ , что полученное тело  $D$  будет иметь центр  $n$ -симметрии именно в этой точке.

**Доказательство.** Выберем начало координат сферической системы в той внутренней точке области  $V$ , в которой должен находиться центр  $n$ -симметрии тела  $D$ . Пусть  $r(\varphi, \theta)$  – расстояние от выбранного начала координат до границы области  $V$  вдоль луча, определяемого углами  $\varphi$  и  $\theta$ . Определим функцию плотности тела  $D$  следующим образом:

$$f(\rho, \varphi, \theta) = \frac{\rho}{[r(\varphi, \theta)]^{n+4}}.$$

Тогда функция  $F_n(\varphi, \theta)$  по условию рассмотренной леммы может быть вычислена так:

$$\begin{aligned} F_n(\varphi, \theta) &= \int_0^{r(\varphi, \theta)} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^{n+2} d\rho = \int_0^{r(\varphi, \theta)} \frac{\rho}{[r(\varphi, \theta)]^{n+4}} \rho^{n+2} d\rho = \\ &= \frac{1}{[r(\varphi, \theta)]^{n+4}} \int_0^{r(\varphi, \theta)} \rho^{n+3} d\rho = \frac{1}{[r(\varphi, \theta)]^{n+4}} \left[ \frac{\rho^{n+4}}{(n+4)} \Big|_0^{r(\varphi, \theta)} \right] = \\ &= \frac{1}{[r(\varphi, \theta)]^{n+4}} \cdot \frac{[r(\varphi, \theta)]^{n+4}}{n+4} = \frac{1}{n+4}. \end{aligned}$$

Таким образом, функция  $F_n(\varphi, \theta)$  оказалась постоянной (не зависящей от углов  $\varphi$  и  $\theta$ ), а потому она является и центрo-симметричной. Следовательно, в силу рассмотренной леммы центр  $n$ -симметрии тела  $D$  будет находиться в начале координат, то есть в нужной точке.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В доказанной теореме установленные ранее теоремы 1 и 2 из работы [24] о центрах  $s$ -симметрии и  $s$ -симметрии распространены на общий случай центров  $n$ -симметрии. Доказательство этой общей теоремы получилось относительно простым благодаря удобному достаточному критерию совпадения центра  $n$ -симметрии выпуклого тела с началом координат, представленному в работе [27]. Этот критерий, в свою очередь, представляет собой обобщение на случай  $n$ -симметрии критерия, установленного в статье [24] для случая  $s$ -симметрии.

**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., Юхвид М.Е. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийным инструментом / под ред. М.А. Эстерзона. М.: [б. и.]. 1994. 185 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.
29. 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.
30. Шум Ал.А., Ветошкин А.М. Теорема о центре  $n$ -симметрии плоской выпуклой пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 3 (19). С. 75–82.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

*ВЕТОШКИН Александр Михайлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики, информатики и вычислительной техники, Мытищинский филиал 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. Теорема о центре  $n$ -симметрии выпуклого пространственного тела // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 4 (20). С. 76–82.

**THEOREM ON THE CENTER OF  $n$ -SYMMETRY  
OF A CONVEX SPATIAL BODY***Al.A. Shum<sup>1</sup>, A.M. Vetoshkin<sup>2</sup>*<sup>1</sup> *Tver State Technical University (Tver)*<sup>2</sup> *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 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 following theorem is proved: in any convex region of space, it is possible to determine the density function so that the center of the  $n$ -symmetry of the resulting body will be located at any predetermined internal point of this body (special cases of this theorem corresponding to the values  $n = 0$  and  $n = 1$  were previously known).

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

**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. Theorem on the center of  $n$ -symmetry of a convex spatial body // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 76–82.

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 691.5:666.943

### СИНТЕЗ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ЩЕЛОЧНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ПРОДУКТОВ ТОПЛИВНЫХ СТАНЦИЙ

*Д.Д. Бабаев, В.Б. Петропавловская, Т.Б. Новиченкова,  
К.С. Петропавловский, М.Ю. Завадько*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Бабаев Д.Д., Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б.,  
Петропавловский К.С., Завадько М.Ю., 2023

**Аннотация.** Рассмотрена проблема утилизации отходов, образовавшихся в результате работы тепловых электростанций в России. Основное внимание уделено вопросам переработки и уменьшения воздействия на окружающую среду. В качестве одного из решений предложено использовать инновационные технологии – геополимеры. Рассмотрена прочность на сжатие и изгиб геополимерных растворов с добавлением золы класса С, а также влияние условий отверждения на их характеристики. Авторы предложили новый подход к описанию пористой структуры материалов на основе фрактальной геометрии. Результаты показали, что при оптимальном модуле активатора можно достичь максимальной прочности при сжатии и наименьшей пористости. Описано также использование молотого гранулированного доменного шлака в качестве сырьевых материалов для производства геополимеров с добавлением золы-уноса. Исследовано влияние различных факторов, включая активации различными щелочными растворами и температуры отверждения, на механические свойства получаемых материалов. Проведен анализ разных суперпластификаторов в свете их эффективности в геополимерных системах с низким содержанием кальция, а также их стабильности в щелочных активаторах. Было обнаружено, что степень разложения суперпластификаторов зависит от щелочности раствора активатора.

**Ключевые слова:** геополимеры, золы ТЭС, доменный гранулированный шлак, щелочная активация, промышленные отходы.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-83-90**

Невозможно представить современный мир без электричества. Тепловые электростанции (ТЭС) производят электроэнергию, сжигая твердое топливо. В России до сих пор большинство электроэнергии вырабатывается на ТЭС, которые используют уголь в качестве исходного топлива, при этом образуется огромное количество тонн отходов. Так, по разным оценкам, в настоящее время на золоотвалах накоплено 1,4–1,8 млрд тонн отходов от сжигания угля, занимающих площадь около 280 км<sup>2</sup>. Однако объем переработки

таких отходов составляет чуть более 10 %, остальная же часть продолжает храниться в отвалах и тем самым наносится вред окружающей среде и человеку [1–3].

Чтобы уменьшить воздействие отходов ТЭС на окружающую среду и снизить потребность в земле для ее утилизации, в 2012 году правительство Российской Федерации поставило несколько задач в документе «Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года» [4]. Наиболее важными из поставленных задач являются следующие: внедрить экологически эффективные инновационные технологии; предотвратить и снизить текущее негативное воздействие на окружающую среду; обеспечить экологически безопасное обращение с отходами. Их решением мы считаем использование вторичных ресурсов, а именно отходов промышленности, в качестве исходного сырья при синтезе геополимерных вяжущих. К таким отходам можно отнести золу, доменный шлак, красный шлам, отработанное стекло или некоторые природные минералы и горные породы. Наибольший интерес представляют отходы ТЭС в виде золы из-за проявления в них активных пуццолановых свойств.

В зависимости от способа удаления золы делят:

на золу – уноса сухого улавливания, когда зола, поступающая с электрофильтров и из циклонов ТЭС в золоборники, направляется специальным пневмотранспортом в силосные склады либо непосредственно в транспортные средства потребителей;

золошлаковую смесь гидроудаления, когда при очистке золоборников с помощью воды зола и шлак в виде золопulpы удаляются в отвалы [5].

Зола-уноса (летучая зола) более активна по сравнению с золой гидроудаления, содержит меньше несгоревших частиц и зимой не смерзается. Вместе с тем она имеет серьезные недостатки: пыление, возможное содержание частиц непогасившейся извести, а также относительно большое количество свободной серы. По гранулометрическому и химическому составу золы из отвалов гидроудаления, по данным отечественных исследований, крайне неоднородны [6].

Частицы летучей золы обычно имеют сферическую форму, и их размер варьируется от 0,5 до 100 мкм. Гранулометрический состав существенно различается в зависимости от типа сжигаемого угля, условий, регулирования охлаждения и процесса горения [7].

В ГОСТ 25818-2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия» делят золу-уноса в зависимости от содержания оксида кальция на кислую (оксид кальция до 10 мас. %) и основную (оксид кальция более 10 мас. %) [8]. В других зарубежных стандартах различают два класса золы: С и F. Летучая зола класса F (кислая) – пуццолановая зола, образующаяся при сжигании антрацита или битуминозного угля. Общее количество  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  должно быть более 70 %. Зола класса С (основная) является пуццолановой и цементирующей, получаемой при сжигании суббитуминозного или бурого угля. Общее количество  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  должно превышать 50 %. Кроме того, мы можем различать классы С и F на базе процентного содержания  $\text{CaO}$ , причем класс С составляет более 10 %, а F – менее 10 % [9].

Геополимеры на основе золы класса С показывают меньшее время схватывания и более высокую прочность при температуре окружающей среды, чем на основе золы класса F благодаря образованию гидрата алюмината кальция в ходе реакции гидратации в раннем возрасте. Однако снижение содержания кальция в геополимерном растворе может увеличить время схватывания и повысить устойчивость геополимера к химическому воздействию.

В исследовании [11] был сделан вывод, что прочность на сжатие и изгиб геополимерных растворов с золой класса С при стандартных условиях отверждения в течение

1 дня с последующим отверждением паром при 60 °С в течение 1 дня составляла 92,7–108,7 % и 88,0–115,1 % от прочности при стандартных условиях отверждения в течение 28 дней.

Авторами данной статьи рассматриваются характеристики, факторы и фрактальные размерности пористой структуры геополимерных материалов, изготовленных на основе золы-уноса, метаксаолина и цемента. Предложен новый подход, основанный на фрактальной геометрии, для более точного описания пористой структуры. Результаты исследования показали, что когда модуль активатора увеличивается до 1,2, щелочность раствора активатора относительно снижается. Это явление приводит к самому высокому содержанию геля и прочности при сжатии, что указывает на оптимальные условия для геополимеризации. При этом конкретном значении модуля активатора наиболее вероятные диаметр пор и пористость являются наименьшими в пределах одной и той же группы образцов, что указывает на наиболее плотную структуру пор. Увеличение концентрации активатора с 25 до 40 % значительно изменит характеристики структуры пор геополимера на основе золы-уноса, содержание геля и прочность на сжатие. В частности, соответствующий наиболее вероятный диаметр пор уменьшается со 112 до 12 нм, соответствующая пористость – на 10%, соответствующее содержание геля увеличивается на 27,47 %, прочность на сжатие соответственно улучшается [12].

Устойчивость к хлоридам важна для долговечности геополимеров, используемых в строительстве, особенно в прибрежных и засоленных районах. В исследовании [13] были изучены обрабатываемость, механические характеристики и стойкость к хлоридам геополимерных растворов на основе летучей золы классов С и F. Авторами был сделан вывод, что более высокая прочность при сжатии вовсе не однозначно указывает на лучшую стойкость к хлоридам. Растворы с низкой прочностью по сравнению с геополимерными растворами высокой и средней прочности демонстрируют отличную стойкость к хлоридам. Количество кристаллических фаз, образовавшихся после погружения в раствор NaCl и воду при 80 °С, было больше, чем до воздействия.

Низкие механические свойства твердеющих геополимеров в окружающей среде более выражены для геополимеров на основе золы-уноса класса F из-за низкого содержания кальция. Чтобы решить данную проблему, авторы работы [14] провели экспериментальное исследование: они смешали золу-уноса класса F с небольшим количеством различных минеральных добавок: кальцита, диоксида кремния и цеолита. Они использовались в бинарной системе с золой-уноса класса F для повышения механических свойств. Результаты подтвердили, что сделанные смеси обладают более высокой прочностью на сжатие и изгиб, чем геополимерные, содержащие только золу-уноса класса F. Диоксид кремния был наиболее эффективной в плане увеличения механических свойств минеральной добавкой. Такие минеральные добавки, как кальцит и цеолит также были действенными, но цеолит оказывал большее воздействие на механические свойства геополимерного раствора на основе золы-уноса класса F при отверждении в окружающей среде.

Один из множества сырьевых материалов для производства геополимеров из золы-уноса – это шлак. Более высокое содержание CaO в таких геополимерах способствует образованию C-(A)-S-H, а это может повысить их прочность и долговечность. В настоящее время шлак используется для улучшения обрабатываемости и механических свойств геополимеров на основе зол [15, 16].

Молотый гранулированный доменный шлак является еще одним побочным продуктом с высокой долей стеклообразной фазы, богатой кремнием, глиноземом и

аморфным кальцием, что делает его пригодным для применения в качестве сырья для синтеза геополимеров. Был изучен синергетический эффект бинарных золошлаковых композиций (в соотношении 50/50), активированных NaOH, отвержденных при 25 °C и достигших значений механической прочности при сжатии около 50 МПа через 28 дней реакции. Кроме того, активированные золошлаковые пасты с NaOH были исследованы с минеральной, механической и микроструктурной точек зрения. Полученные результаты продемонстрировали наличие двух продуктов для взаимодействия. Продукт реакции с  $Ca / Si = 0,8$ ,  $Al / Ca = 0,6$  и  $Si / Al = 2-3$  соответствует гидратированному гелю, богатому  $Al^{3+}$ , включающему в свою структуру Na. Другим продуктом гидратации является щелочной алюмосиликат с трехмерной структурой [17, 18].

Авторы работы [19] изучали синергический эффект геополимера на основе летучей золы и шлака при их различных соотношениях (от 20 до 60 мас. %), активированного тремя растворами NaOH (0,5, 1 и 1,5%-м соответственно). Экспериментальные образцы были отверждены через 1, 3, 7 и 28 дней. Было замечено, что с увеличением содержания шлака в геополимере возрастает сопротивление сжатию, что приводит к оптимальной прочности при сжатии около 93 МПа.

В работе [20] было изучено влияние 5 мас. %  $\mu$ -известняка в смесях гранулированного доменного шлака и золы-уноса, активированных гидроксидом натрия (NaOH) в различных концентрациях, для оценки физических свойств в свежем и затвердевшем состояниях. Добавление  $\mu$ -известняка изменило заявленные значения прочности при сжатии (с 20 до 45 МПа за 28 дней). С помощью метода атомной абсорбции было обнаружено, что  $CaCO_3$   $\mu$ -известняка растворился в NaOH, осадив  $Ca(OH)_2$  в качестве продукта реакции. Анализ SEM-EDS показал химическое взаимодействие гелей C-A-S-H- и N-A-S-H-типа с  $Ca(OH)_2$ , образующих гели (N, C)A-S-H- и C-(N)-A-S-H-типа, улучшающие механические характеристики и микроструктурные свойства. Добавление  $\mu$ -известняка оказалось перспективной и дешевой альтернативой, способствующей улучшению свойств щелочного цемента с низкой молярностью, поскольку оно помогло превысить рекомендованное действующими нормативами для обычного цемента значение, равное 20 МПа.

Основной проблемой при использовании композиционных вяжущих является их огромная потребность в воде, обусловленная высокой тонкостью и удельной поверхностью, что увеличивает вязкость и предел текучести вяжущих. Обычно суперпластификаторы, такие как поликарбоксилатные эфиры или поликонденсаты, применяются для контроля и корректировки термических свойств вяжущих материалов. Когда в вяжущих системах используются суперпластификаторы, между ними и вяжущим возникает адсорбционная конкуренция за суперпластификатор [21, 22].

В работе [23] было систематически изучены различные суперпластификаторы (поликарбоксилатного, метакрилатного, изопренолового и металилового эфира) с точки зрения их стабильности в различных щелочных активаторах (NaOH, KOH, растворах силикатов натрия и калия). Эффективность суперпластификаторов в геополимерных вяжущих с низким содержанием кальция была подтверждена реологическими испытаниями. Исследованные суперпластификаторы показали загущающий эффект в геополимерной системе с указанным содержанием кальция. В зависимости от щелочности раствора активатора у всех изученных суперпластификаторов был обнаружен процесс разложения. Боковые цепи суперпластификаторов отщепляются от основной цепи путем гидролиза основного сложного эфира и простого. Наибольшая степень разложения была

обнаружена в растворах силикатов натрия и калия. В щелочных растворах гидроксида процесс разложения усиливается с повышением щелочности.

Хотелось бы еще раз отметить, что Россия продолжает активно использовать уголь для выработки электроэнергии, однако это приводит к образованию большого количества отходов, занимающих значительные территории и представляющих угрозу для окружающей среды и здоровья человека. Одним из возможных решений данной проблемы является применение вторичных ресурсов, в том числе переработка отходов ТЭС для минимизации негативного воздействия этих отходов на экологию.

Зола-уноса и зола гидроудаления имеют каждая свои преимущества и недостатки. Зола-уноса более активна и содержит меньше несгоревших частиц; ее недостатками являются пыление и возможное содержание непогасившейся извести. Геополимеры на основе основной золы (класса С) быстрее схватываются и обладают более высокой прочностью при комнатной температуре, чем геополимеры на кислой золе (класса F) благодаря образованию гидрата алюмината кальция. Однако геополимеры на основе кислой золы характеризуются более высокой прочностью при повышенных температурах и лучшей стойкостью к коррозии.

Молотый гранулированный доменный шлак также может использоваться как сырье для синтеза геополимеров благодаря высокому содержанию в нем стеклообразной фазы, содержащей кремний, глинозем и аморфный кальций. Шлак применяется для улучшения обрабатываемости и механических свойств геополимеров, так как высокое содержание в нем СаО способствует образованию С-(А)-S-H.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Досмухамедов Н.К., Каплан В.А., Даруеш Г.С. Инновационная технология комплексной переработки золы от сжигания угля // *Уголь*. № 1. С. 58–63.
2. Осокин Н.А., Золотова И.Ю., Никитушкина Ю.В. Снижение антропогенного воздействия дорожного строительства за счет применения золошлаковых отходов // *Экономическая наука современной России*. 2022. № 1 (96). С. 81–93.
3. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // *Проблемы региональной экологии*. 2019. № 4. С. 77–87.
4. Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/osnovy-gosudarstvennoi-politiki-v-oblasti-ekologicheskogo-razvitiya/> (дата обращения: 06.07.2023).
5. Барыбина Т.А., Голубничий А.А. Применение золошлаковых отходов в строительстве автомобильных дорог на территории РФ // *Форум молодых ученых*. 2017. № 6 (10). С. 134–138.
6. Кошмамат У.К. Перспективы использования вторичного сырья угольной золы тепловых электростанций в строительстве // *Территория науки*. 2016. № 5. С. 40–45.
7. Yousuf A., Manzoor S.O., Youssouf M., Malik Z., Khawaja K.S. Fly Ash: Production and Utilization in India – An Overview // *Journal of Materials and Environmental Science*. 2020. № 11, pp. 911–921.
8. ГОСТ 25818-2017. Золоуноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.status-grunt.ru/upload/bases/26.pdf> (дата обращения: 06.07.2023).

9. Alterary S., Marei N. Fly Ash properties, characterization, and applications: a review // *Journal of King Saud University – Science*. 2021. № 33 (6), p. 101536. URL: [https://www.researchgate.net/publication/353033690\\_Fly\\_Ash\\_properties\\_characterization\\_and\\_applications\\_a\\_review](https://www.researchgate.net/publication/353033690_Fly_Ash_properties_characterization_and_applications_a_review) (дата обращения: 06.07.2023).
10. Nuaklong P., Wongs A., Sata V., Boonserm K., Sanjayan J., Chindaprasirt P. Properties of high-calcium and low-calcium fly ash combination geopolymer mortar containing recycled aggregate // *Heliyon*. 2019. № 5 (9), p. 02513. URL: [https://www.researchgate.net/publication/336138519\\_Properties\\_of\\_high-calcium\\_and\\_low-calcium\\_fly\\_ash\\_combination\\_geopolymer\\_mortar\\_containing\\_recycled\\_aggregate](https://www.researchgate.net/publication/336138519_Properties_of_high-calcium_and_low-calcium_fly_ash_combination_geopolymer_mortar_containing_recycled_aggregate) (дата обращения: 06.07.2023).
11. Li X., Wang Z., Jiao Z. Influence of Curing on the Strength Development of Calcium-Containing Geopolymer Mortar // *Materials*. 2013. № 6 (11), pp. 5069–5076.
12. Yang Y., Wang B., Yuan Q., Huang D., Peng H. Characterization, Factors, and Fractal Dimension of Pore Structure of Fly Ash-based Geopolymers // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. № 26, pp. 3395–3407.
13. Zhenzhen J., Xueying L., Qinglin Y., Qinqin Y., Xinchun G., Ping H. Chloride Resistance of Class C/class F Fly Ash-based Geopolymer Mortars with Different Strength Grades // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. № 18.
14. Öztürk O. Binary Use of F-Class Fly-ash with Different Aluminosilicates for the Improved Mechanical Properties of Ambient-Cured Geopolymer Mortars // *International Conference on Cement-based Materials Tailored for a Sustainable Future*. In the honour of Prof. Surendra P. Shah and Prof. Turan Özturan. İstanbul. URL: [https://www.researchgate.net/publication/352381585\\_Binary\\_Use\\_of\\_F-Class\\_Fly-ash\\_with\\_Different\\_Aluminosilicates\\_for\\_the\\_Improved\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Ambient-Cured\\_Geopolymer\\_Mortars](https://www.researchgate.net/publication/352381585_Binary_Use_of_F-Class_Fly-ash_with_Different_Aluminosilicates_for_the_Improved_Mechanical_Properties_of_Ambient-Cured_Geopolymer_Mortars) (дата обращения: 06.07.2023).
15. Dehghani A., Aslani F., Panah N.G. Effects of initial  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  molar ratio and slag on fly ash-based ambient cured geopolymer properties // *Construction and Building Materials*. 2021. № 293 (7). URL: [https://www.researchgate.net/publication/351512122\\_Effects\\_of\\_initial\\_SiO2\\_Al2O3\\_molar\\_ratio\\_and\\_slag\\_on\\_fly\\_ash-based\\_ambient\\_cured\\_geopolymer\\_properties](https://www.researchgate.net/publication/351512122_Effects_of_initial_SiO2_Al2O3_molar_ratio_and_slag_on_fly_ash-based_ambient_cured_geopolymer_properties) (дата обращения: 06.07.2023).
16. Puertas F., Martínez-Ramírez S., Alonso S., Vázquez T. Alkali-activated fly ash/slag cements: Strength behaviour and hydration products // *Cement and Concrete Research*. 2000. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Alkali-activated-fly-ash-slag-cements%3A-Strength-and-Puertas-Mart%C3%ADnez-Ram%C3%ADrez/cd9a282ef654b0ac0cd7403a7fc70b0eb11545df> (дата обращения: 06.07.2023).
17. Aydın S., Baradan B. Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars // *Composites. Part B: Engineering*. 2014. № 57, pp. 166–172.
18. Rafeet A., Vinai R., Soutsos M., Wei S. Guidelines for Mix Proportioning of Fly Ash/GGBS Based Alkali Activated Concretes // *Construction and Building Materials*. 2017. № 147, pp. 130–142.
19. Wang W.-C., Wang H.-Y., Lo M.-H. The Fresh and Engineering Properties of Alkali Activated Slag as a Function of Fly Ash replacement and Alkali Concentration // *Construction and Building Materials*. 2015. № 84, pp. 224–229.
20. Vázquez-Rodríguez F., Elizondo N., Montes-González M., Rodríguez C., González-Carranza Y., Guzman A.M., Rodríguez E.A. Microstructural and Mechanical Characteristics of Alkali-Activated Binders Composed of Milled Fly Ash and Granulated Blast Furnace Slag with  $\mu$ -Limestone Addition [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/>

publication/370864676\_Microstructural\_and\_Mechanical\_Characteristics\_of\_Alkali-Activated\_Binders\_Composed\_of\_Milled\_Fly\_Ash\_and\_Granulated\_Blast\_Furnace\_Slag\_with\_-Limestone\_Addition (дата обращения: 07.07.2023).

21. Lei L., Chan H.-K. Investigation into the molecular design and plasticizing effectiveness of HPEG-based superplasticizers in alkali-activated slag [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/342337887\\_Investigation\\_into\\_the\\_molecular\\_design\\_and\\_plasticizing\\_effectiveness\\_of\\_HPEG-based\\_polycarboxylate\\_superplasticizers\\_in\\_alkali-activated\\_slag](https://www.researchgate.net/publication/342337887_Investigation_into_the_molecular_design_and_plasticizing_effectiveness_of_HPEG-based_polycarboxylate_superplasticizers_in_alkali-activated_slag) (дата обращения: 07.07.2023).

22. Lei L., Zhang Y. Preparation of isoprenol ether-based polycarboxylate superplasticizers with exceptional dispersing power in alkali-activated slag: Comparison with ordinary Portland cement // *Composites. Part B: Engineering*. 2021. № 223, p. 109077. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/J.COMPOSITESB.2021.109077> (дата обращения: 07.07.2023).

23. Partschefeld S., Tatal A., Halmanseder T., Schneider J., Dimmig-Osburg A. Investigations on Stability of Polycarboxylate Superplasticizers in Alkaline Activators for Geopolymer Binders // *Materials*. 2023. URL: [https://www.researchgate.net/publication/372768266\\_Investigations\\_on\\_Stability\\_of\\_Polycarboxylate\\_Superplasticizers\\_in\\_Alkaline\\_Activators\\_for\\_Geopolymer\\_Binders](https://www.researchgate.net/publication/372768266_Investigations_on_Stability_of_Polycarboxylate_Superplasticizers_in_Alkaline_Activators_for_Geopolymer_Binders) (дата обращения: 07.07.2023).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*БАБАЕВ Даниил Дмитриевич* – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: [dr.d1708@yandex.ru](mailto:dr.d1708@yandex.ru)

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

*НОВИЧЕНКОВА Татьяна Борисовна* – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: [tanovi.69@mail.ru](mailto:tanovi.69@mail.ru)

*ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ Кирилл Сергеевич* – кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: [kspetrovavlovsky@gmail.com](mailto:kspetrovavlovsky@gmail.com)

*ЗАВАДЬКО Мария Юрьевна* – кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: [79043517876@yandex.ru](mailto:79043517876@yandex.ru)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Бабаев Д.Д., Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Завадько М.Ю. Синтез геополимерных композиций на основе щелочных техногенных продуктов топливных станций // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 4 (20). С. 83–90.

**SYNTHESIS OF GEOPOLYMER COMPOSITIONS BASED  
ON ALKALINE TECHNOGENIC PRODUCTS OF FUEL STATIONS**

*D.D. Babaev, V.B. Petropavlovskaya, T.B. Novichenkova  
K.S. Petropavlovskii, M.Yu. Zavadko  
Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The problem of waste disposal resulting from the operation of thermal power plants in Russia is considered. The main attention is paid to the issues of recycling and reducing the impact on the environment. As one of the solutions, it is proposed to use innovative technologies – geopolymers. The compressive and bending strength of geopolymer solutions with the addition of ash of class C, as well as the effect of curing conditions on their characteristics, are considered. The authors proposed a new approach to the description of the porous structure of materials based on fractal geometry. The results showed that with an optimal activator module, maximum compressive strength and the lowest porosity can be achieved. The use of ground granulated blast furnace slag as raw materials for the production of geopolymers with the addition of fly ash is also described. The influence of various factors, including activation by various alkaline solutions and the curing temperature, on the mechanical properties of the obtained materials has been investigated.

**Keywords:** geopolymers, CHP ash, blast furnace granular slag, alkaline activation, industrial waste.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*BABAEV Daniil Dmitrievich* – Master's Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: dr.d1708@yandex.ru

*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

*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

*ZAVADKO Maria Yurievna* – Candidate of Technical Sciences, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: 79043517876@yandex.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Babaev D.D., Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Zavadko M.Yu. Synthesis of geopolymer compositions based on alkaline technogenic products of fuel stations // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 83–90.

УДК 628.477.2; 502.504

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ МАСЕЛ***О.П. Филиппова<sup>1</sup>, С.З. Калаева<sup>1</sup>, Э.С. Цховребов<sup>2</sup>, Е.С. Сергеев<sup>1</sup>*<sup>1</sup> *Ярославский государственный технический университет (г. Ярославль)*<sup>2</sup> *ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт  
по проблемам гражданской обороны  
и чрезвычайных ситуаций МЧС России» (г. Москва)*© Филиппова О.П., Калаева С.З.,  
Цховребов Э.С., Сергеев Е.С., 2023

**Аннотация.** Отмечено, что в последние годы существенно увеличивается количество образующихся, накапливаемых и хранимых на предприятиях отработанных масел. На основе анализа химического состава, физико-химических показателей и сопоставления инфракрасных спектров обоснована возможность использования отработанных минеральных, промышленных и пищевых масел для приготовления консервационных смазок, производства антикоррозионных покрытий. Сделан вывод, что отдельный сбор, изолированное, безопасное для окружающей среды накопление, промышленная обработка и утилизация отработанных масел способствуют реализации мер для защиты населения и территорий регионов от экологической опасности, создаваемой негативным воздействием производственных отходов на окружающую среду.

**Ключевые слова:** отработанное масло, антикоррозионное покрытие, дисперсионная среда, утилизация, отходы, экологическая безопасность.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-91-96****ВВЕДЕНИЕ**

В общей массе токсичных отходов производства и потребления можно выделить большое количество различных отработанных масел. Это связано с ежегодным увеличением объемов использования чистых масел и, как следствие, объемов образующихся отходов. Спектр применения масел крайне широк (от смазочных и топливных материалов до пищевых добавок), поэтому загрязнение окружающей среды экологически опасными компонентами, входящими в их состав, все увеличивается [1].

В процессе эксплуатации автомобиля моторное масло подвергается старению и теряет свои эксплуатационные свойства. В их составе могут появляться различные смолы, карбены, асфальтены, полиолефины и другие вещества, вредные для окружающей среды и человека. Разлив на территории или сжигание без специальных защитных устройств отработанных масел приводит к ухудшению состояния водоемов, почвы, атмосферного воздуха, а также негативно сказывается на здоровье людей.

Однако отработанные масла, помимо массы недостатков, обладают важным полезным свойством: они могут служить углеродным вторичным сырьем [2–4]. Поэтому вопрос их экологически безопасной утилизации является актуальным и с природоохранной, ресурсосберегающей, и с экономической точки зрения.

Проведенное исследование направлено на улучшение защиты природной среды, населения и территорий от экологической опасности, вызванной негативным воздействием токсичных отходов отработанного масла различных видов, повышение уровня ресурсосбережения и повторного применения отходов в различных отраслях и секторах экономики [5–9].

### **ОБЪЕКТЫ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Объекты исследования – предварительно профильтрованные отработанные масла различного происхождения, а именно пищевое (ОПМ), индустриальное (ОИМ), синтетическое и минеральное (ОММ) моторные масла. В образцах были определены содержание влаги и минеральных компонентов, кислотного, йодного чисел и количество неомыляемых веществ, а также сняты инфракрасные спектры (ИК-спектры) на приборе PerkinElmer Spectrum RX I. Во время анализа использовали стандартизированные методы и поверенное оборудование.

Материалами для изучения выступили опубликованные труды российских и зарубежных ученых, результаты собственных исследований, посвященных проблемам обработки и утилизации промышленных отходов, ресурсосбережения, экологической безопасности территорий.

В качестве основного метода исследования реализован системный анализ технологий, методов обработки и утилизации отходов отработанных масел для нужд экономики.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В рецепт стандартного антикоррозионного покрытия входят твердый загуститель (антикоррозионный пигмент), жидкая маслянистая основа, в которой распределен пигмент, и различные присадки. Выбранные отработанные масла предлагается использовать в качестве дисперсионной среды при получении таких защитных покрытий. Для проверки возможности применения отработанных масел был определен их состав (табл. 1).

Таблица 1

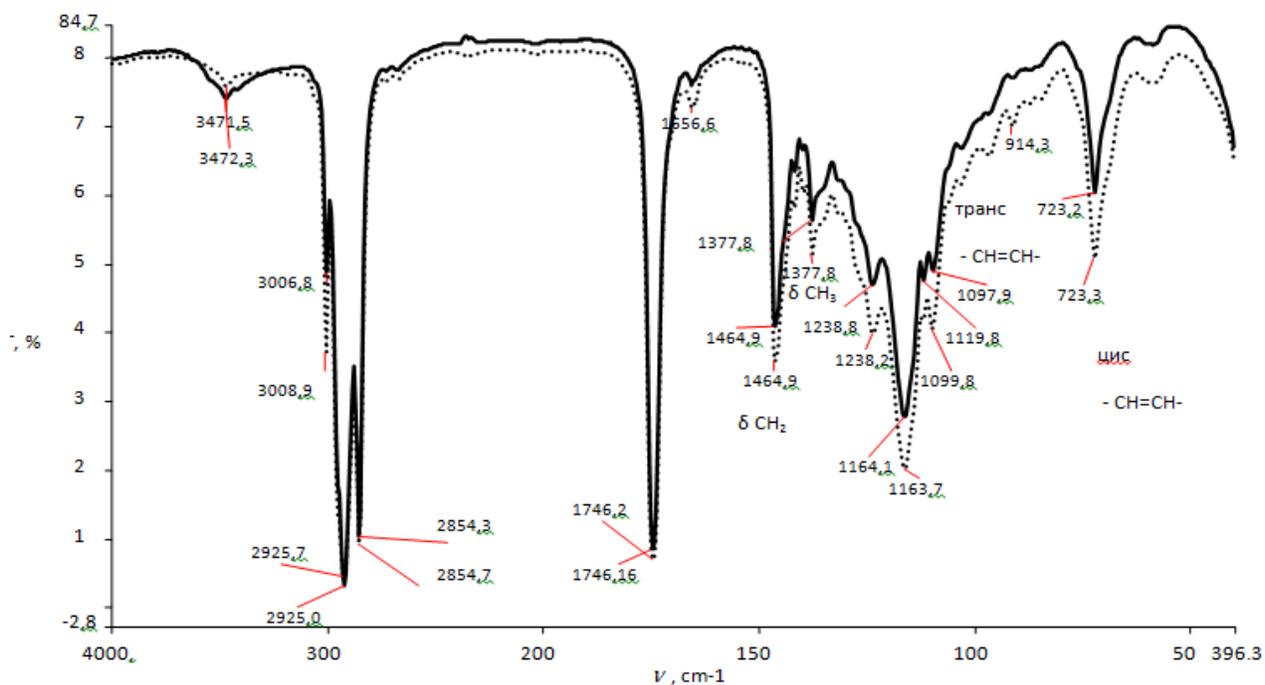
Состав отработанных масел

Тип отработанного масла	Результаты, %	
	Минеральная часть	Влажность
Пищевое	0,04	0,75
Индустриальное	0,02	0,9
Синтетическое	0,04	2,1
Минеральное	0,06	0,54

Исходя из данных табл. 1, можно сделать вывод, что влажность менее 1 % [10] имеют ОПМ, ОИМ и ОММ, поэтому для антикоррозионной защиты металлических изделий лучше использовать данные отработанные масла. Согласно результатам биотестирования (в качестве тест-объектов выступили *Ceriodaphnia affinis*), ОИМ имеет II класс опасности, ОПМ и ОММ – III [11].

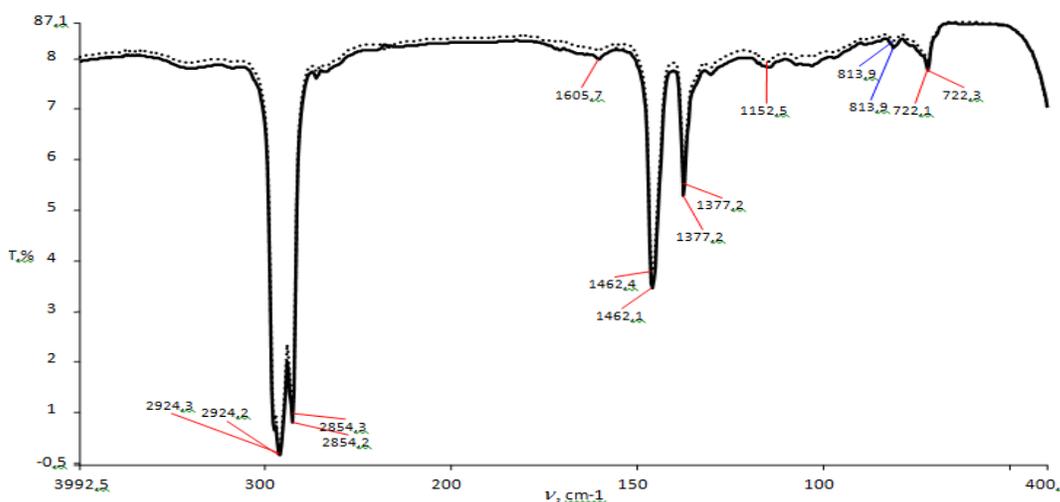
В процессе эксплуатации масла подвергаются воздействию высоких температур, из-за чего в этих маслах происходит ряд превращений, среди которых следует выделить гидролиз, окисление и пирогенетический распад. Указанные процессы приводят к изменению структуры масел. Чтобы проверить критичность таких изменений были использованы ИК-спектроскопия (рисунок) и методы химического анализа (табл. 2). Для

оценки осуществления исследуемых процессов отработанного моторного масла был выделен спектр изучаемых параметров: кислотное число, йодное число и число омыления.



— Подсолнечное чистое  
..... Подсолнечное отработанное

а



— Индустриальное чистое  
..... Индустриальное отработанное

б

Инфракрасный спектр чистого и отработанного подсолнечного (а) и индустриального (б) масел

Таблица 2

## Химический анализ отработанного растительного масла

Показатели	Отработанное растительное масло	Чистое растительное масло
Кислотное число, мг КОН/г	12	Не более 15
Йодное число, мг I <sub>2</sub> /100 г	93,9	125–145
Массовая доля неомыляемых веществ, %	1,0	Не более 1,2

**ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ**

Накопленные использованные масла, неоднородные по составу, представляют собой угрозу для природной среды и ее ресурсов, безопасности жизнедеятельности населения, вследствие чего вопрос утилизации таких масел не следует считать неактуальным. Авторы данной статьи предлагают в качестве одного из способов экологически безопасной обработки и последующей утилизации рассмотренных отходов их применение как материала для антикоррозионной защиты.

На основании проведенных экспериментов установлено, что в результате воздействия на масло высоких температур их структура меняется незначительно. Таким образом, отработанные масла можно рекомендовать в качестве дисперсионной среды для получения антикоррозионных покрытий.

Осуществленные исследования могут стать частью комплексной программы по обработке, утилизации производственных отходов предприятий различных отраслей и секторов экономики, призванной обеспечить экологическую безопасность регионов России и переход отечественной экономики на ресурсосберегающий технологический уклад.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Пахотина И.Н., Пахотин Н.Е. Экологическая безопасность утилизации отработанных масел // *Автомобили, транспортные системы и процессы: настоящее, прошлое, будущее: Сборник статей Международной научно-технической конференции*. Курск: ЮЗГУ. 2019. С. 131–133.
2. Евдокимов А.Ю., Фукс И.Г., Шабалина Т.Н., Багдасаров Л.Н. Смазочные материалы и проблемы экологии. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 2000. 424 с.
3. Головников А.В., Филиппова О.П., Яманина Н.С., Копылов А.Б. Исследование структуры, свойств и физико-химических характеристик отработанных масел // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2012. Вып. 1. С. 120–126.
4. Утилизация отработанного моторного и других видов масел [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bezotxodov.ru/avto/utilizacija-otrabotannogo-masla> (дата обращения: 13.09.2023).
5. Цховребов Э.С. Эколого-экономические аспекты планирования размещения и проектирования промышленных объектов по обработке, утилизации, обезвреживанию отходов // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 11 (122). С. 1326–1340.

6. Tskhovrebov E., Velichko E., Niyazgulov U. Planning Measures for Environmentally Safe Handling with Extremely and Highly Hazardous Wastes in Industrial, Building and Transport Complex // *Materials Science Forum*. 2019. V. 945, pp. 988–994.
7. Цховребов Э.С. Формирование региональных стратегий управления обращением с вторичными ресурсами // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 4 (127). С. 453.
8. Velichko E., Tskhovrebov E., Shevchenko A. Environmental safety providing during heat insulation works and using thermal insulation materials // *MATEC Web of Conferences*. 2017. P. 03009.
9. Кожуховский И.С., Величко Е.Г., Целыковский Ю.К., Цховребов Э.С. Организационно-экономические и правовые аспекты создания и развития производственно-технических комплексов по переработке золошлаковых отходов в строительную и иную продукцию // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 6 (129). С. 756–773.
10. Ласкорин Б.Н., Громов Б.В., Цыганков А.П., Сенин В.Н. Безотходная технология в промышленности, М.: Стройиздат. 2006. 158 с.
11. Сергеев Е.С., Филиппова О.П., Калаева С.З. Токсикологическая оценка различных видов отработанных масел // *От химии к технологии шаг за шагом*. 2022. Т. 3. Вып. 4. С. 8–14.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*ФИЛИППОВА Ольга Павловна* – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Россия, 150023, г. Ярославль, Московский проспект, д. 88. E-mail: filippovaop@ystu.ru

*КАЛАЕВА Сахиба Зияддиновна* – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Охрана труда и природы», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Россия, 150023, г. Ярославль, Московский проспект, д. 88. E-mail: kalaevasz@ystu.ru

*ЦХОВРЕБОВ Эдуард Станиславович* – кандидат экономических наук, доцент, старший научный сотрудник ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России», Россия, 121352, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7. E-mail: rebrovstanislav@rambler.ru

*СЕРГЕЕВ Егор Сергеевич* – аспирант, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Россия, 150023, г. Ярославль, Московский проспект, д. 88.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Филиппова О.П., Калаева С.З., Цховребов Э.С., Сергеев Е.С. Технологические аспекты экологически безопасной утилизации отработанных масел // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 4 (20). С. 91–96.

**TECHNOLOGICAL ASPECTS OF ENVIRONMENTALLY SAFE DISPOSAL  
OF WASTE OILS*****O.P. Filippova<sup>1</sup>, S.Z. Kalaeva<sup>1</sup>, E.S. Tskhovrebov<sup>2</sup>, E.S. Sergeev<sup>1</sup>***<sup>1</sup>*Yaroslavl State Technical University (Yaroslavl)*<sup>2</sup>*All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations  
of the Ministry of Emergency Situations of Russia (Moscow)*

**Abstract.** It is noted that in recent years, the amount of waste oils generated, accumulated and stored at enterprises has been significantly increasing. Based on the analysis of chemical composition, physico-chemical parameters and comparison of infrared spectra, the possibility of using spent mineral, industrial and edible oils for the preparation of preservative lubricants, the production of anticorrosive coatings is substantiated. It is concluded that separate collection, isolated, environmentally safe accumulation, industrial processing and disposal of waste oils contribute to the implementation of measures to protect the population and territories of the regions from environmental hazards created by the negative impact of industrial waste on the environment.

**Keywords:** used oil, anticorrosive coating, dispersion medium, recycling, waste, environmental safety.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*FILIPPOVA Olyga Pavlovna* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Yaroslavl State Technical University, 88, Moskovsky pr., Yaroslavl, 150023, Russia. E-mail: filippovaop@ystu.ru

*KALAEVA Sahiba Ziyaddinovna* – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Labor and Nature Protection, Yaroslavl State Technical University, 88, Moskovsky pr., Yaroslavl, 150023, Russia. E-mail: kalaevasz@ystu.ru

*TSKHOVREBOV Edward Stanislavovich* – PhD in Economics, Associate Professor, Senior Researcher of All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 7, Davydkovskaya str., Moscow, 121352, Russia. E-mail: rebrovstanislav@rambler.ru

*SERGEEV Evgeniy Sergeevich* – Postgraduate Student, Yaroslavl State Technical University, 88, Moskovsky pr., Yaroslavl, 150023, Russia.

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Filippova O.P., Kalaeva S.Z., Tskhovrebov E.S., Sergeev E.S. Technological aspects of environmentally safe disposal of waste oils // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 91–96.

УДК 550.837:621.396.96

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА  
УПРУГОГО ИМПУЛЬСА ПРИ ОТРАЖЕНИИ  
И ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ САПРОПЕЛЬ***Г.Н. Иванов, И.В. Кривенко, М.А. Смирнова, С.Р. Испирян  
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Иванов Г.Н., Кривенко И.В.,  
Смирнова М.А., Испирян С.Р., 2023

**Аннотация.** Рассмотрена актуальная тема повышения возможностей звуколокационной съемки сапропелевых месторождений. Проведено математическое моделирование спектров отраженных и преломленных импульсов с учетом характерных зависимостей коэффициента поглощения от частоты, типичных для различных видов минеральных грунтов, так как изучение спектров отраженных и преломленных сигналов, возникающих при звуколокационном зондировании его слоев, дает информацию о количественном и качественном составе слоя. В результате вычислительных экспериментов получены зависимости интенсивности таких сигналов от частоты, позволяющие отличить сапропель от других видов грунта. Указано, что результаты исследований могут быть использованы при определении мощности и качества залегающих слоев без отбора проб путем соответствующего изменения параметров приемного канала аппаратуры и расшифровке спектров вышеназванных сигналов.

**Ключевые слова:** сапропель, минеральные грунты, сейсмоакустические методы, звуколокация, математическое моделирование, зависимость, коэффициент поглощения, частота, спектр, отраженный сигнал, преломленный сигнал.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-97-105****ВВЕДЕНИЕ**

Сапропель – илистые отложения пресных континентальных водоемов, содержащие свыше 15 % органических веществ. Материалом для образования сапропеля являются остатки организмов, населяющих толщу донных отложений (бентос), воду (планктон) и ее поверхность (макрофиты), а также поступающие с водосбора растворенные вещества и минеральные частицы. Формирование сапропеля происходит под воздействием биохимических, микробиологических и механических процессов. Минеральная часть сапропеля содержит большое количество микроэлементов (Co, Mn, Cu и др.). Сапропели богаты витаминами, каротиноидами, ферментами.

Общая площадь сапропелевых отложений Тверской области составляет 87 807 га с запасом сапропеля 747 700 000 тонн.

Сапропель используется как высокоэффективное экологически чистое удобрение при приготовлении питательных смесей и компостов. Некоторые виды сапропеля применяются как связующая добавка для производства буровых растворов, строительных материалов. Особую роль играет сапропель в медицине (служит бальнеологическим средством) [1, 2]

Цель сейсмоакустических исследований – изучение геологического разреза до глубины менее 100 м с разрешающей способностью 0,5–5 м. Во время таких исследований применяются в акваториях более высокочастотные (по сравнению с сейморазведкой) импульсные источники упругих волн, а также компактные буксируемые приемные системы.

В СССР работы с использованием сейсмоакустических методов в акваториях производились в МГУ (такими учеными, как А.В. Калинин, В.В. Калинин, Б.Л. Пивоваров и др.), МГРИ (здесь следует назвать таких сотрудников университета, как В.Л. Мирандов, А.Г. Длугач), ЛГУ (прежде всего Е.Ф. Дубровым).

В Тверском государственном техническом университете (в середине XX в. был Калининским политехническим институтом, КПИ), начиная с 60-х годов прошлого века, проводились работы по разведке озерных месторождений и определения его запасов методами сейсмоакустики.

С помощью сейсмоакустических методов, например звуколокации, акустического каротажа и акустического «просвечивания», изучают торф и сапропель как в условиях их естественного залегания, так и в лабораторных [3–10]. Все эти методы основаны на эксплуатации главным образом кинетических особенностей прохождения зондирующего импульса в различных средах. Динамические характеристики импульса и особенно изменение его спектрального состава практически не применяются.

Еще в 50-е годы прошлого века некоторые исследователи указывали, что форма отраженного от дна моря сигнала зависит от типа грунта [9]. В настоящее время изменение состава спектра упругого импульса используется для изучения свойств различных веществ, проводится спектральный анализ звуковой речи и т.д.

При отражении зондирующего упругого импульса от среды, обладающей поглощением упругих колебаний, последний претерпевает определенные изменения спектрального состава. Поскольку каждая среда обладает собственными упругими параметрами, обусловленными акустическими свойствами данной среды, трансформация спектрального состава зондирующего импульса может служить характеристикой данной отражающей среды.

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Исследовано отражение и прохождение зондирующего акустического сигнала при его взаимодействии с сапропелем и минеральными грунтами методами математического моделирования. Проведены вычислительные эксперименты. Варьировались зависимости коэффициента поглощения от частоты, в том числе, нелинейная зависимость.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Проведен теоретический анализ возможных изменений спектрального состава зондирующего импульса.

Пусть зондирующий импульс задан функцией

$$f(t) = A \sin \omega_0 t$$

на временном интервале от 0 до  $\tau$ , где  $\tau$  – длительность импульса;  $A$  – его амплитуда колебаний;  $\omega_0 = 2\pi\nu_0$  ( $\nu_0$  – несущая частота).

Как известно, спектральная плотность непериодической на бесконечном интервале функции определяются выражением

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt ,$$

где  $\omega = 2\pi\nu$  – циклическая частота;  $i = \sqrt{-1}$ .

Так как функция  $f(t)$  задана на конечном временном интервале, для нее применимо выражение текущей спектральной плотности:

$$S_{\tau}(\omega) = \int_0^{\tau} f(t)e^{-i\omega t} dt.$$

Абсолютное значение (модуль) этой величины называется просто спектром:

$$\Phi(\omega) = |S(\omega)|.$$

Текущий спектр синусоиды определяется известным выражением:

$$\Phi_{\tau} = \frac{2A}{\omega_0 \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)} \sin \frac{n\pi\omega}{2\omega_0}, \quad (1)$$

где  $n$  – число полупериодов в импульсе.

Графически зависимость (1) представлена кривой на рис. 1.

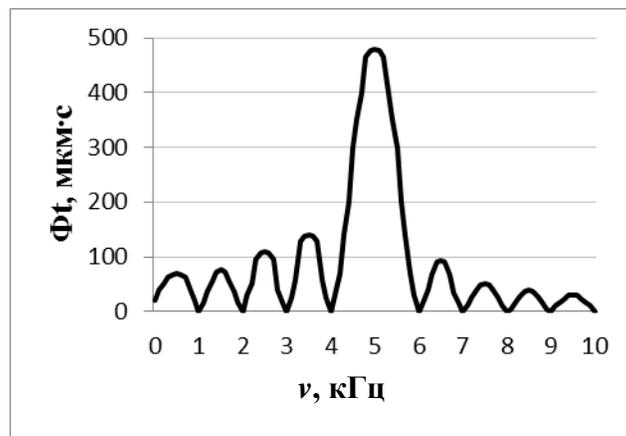


Рис. 1. Спектр зондирующего импульса

Исходные данные импульса:  $\tau = 1$  мс;  $\nu_0 = 5$  кГц;  $A = 0,1$  мм. Отраженный сигнал можно представить в виде

$$f_{от}(t) = f(t)K,$$

где  $K = ke^{-i\beta t}$  – комплексный коэффициент отражения среды;  $k$  – модуль коэффициента отражения;  $\beta$  – коэффициент затухания упругих колебаний в отражающей среде.

Следовательно, отраженный импульс в нашем случае можно представить следующим образом:

$$f_{от}(t) = Ake^{-i\beta t} \cdot \sin \omega_0 t,$$

а текущая спектральная плотность будет определяться выражением

$$S_{\tau от}(\omega) = \int_0^{\tau} Ake^{-i\beta t} \cdot \sin \omega_0 t \cdot e^{-i\omega t} dt. \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что изменение спектра отраженного сигнала характеризуется модулем коэффициента отражения  $k$  и коэффициентом затухания  $\beta$ .

Модуль коэффициента отражения  $k$  мало влияет на изменение спектра отраженного сигнала, так как практически не зависит от частоты. Таким образом, изменение спектра отраженного сигнала описывается коэффициентом затухания или коэффициентом поглощения отражающей среды, который является функцией частоты упругих колебаний. Коэффициент затухания  $\beta$  характеризует уменьшение амплитуды упругих колебаний в среде с течением времени и функционально связан с коэффициентом поглощения  $\alpha$ , дающим представление об уменьшении амплитуды упругих колебаний по

мере их распространения в среде, согласно формуле

$$\alpha = \frac{\beta}{V},$$

где  $V$  – скорость распространения упругих колебаний.

В диапазоне частот, реально применимых в звуколокации ( $\nu_0 = 0,5\text{--}100$  кГц), дисперсия скорости звука в грунтах практически отсутствует, поэтому зависимость между коэффициентами затухания и поглощения можно считать линейной.

В литературе указывается два случая зависимости  $\alpha$  от частоты упругих колебаний в минеральных грунтах:

первый – в скальных грунтах, состоящих из изверженных, метаморфических и осадочных горных пород с жесткой связью между зернами, как правило, с большим содержанием  $\text{SiO}_2$  (кислые породы) или  $\text{MgO}$  (основные):

$$\alpha \cong \omega; \quad (3)$$

второй – в рыхлых (нескальных) грунтах аналогичного химического состава

$$\alpha \cong \omega^2. \quad (4)$$

В наших исследованиях для сапропелей – органоминеральных отложений пресных водоемов (с содержанием органического вещества более 15 %) – получена зависимость вида [6, 7]

$$\alpha \cong \sqrt{\omega}. \quad (5)$$

Можно полагать, что зависимости (3), (4) характерны для минеральных донных отложений, а зависимость (5) – для органических и органоминеральных отложений.

Спектры отраженных сигналов при одинаковом модуле коэффициента отражения рассчитаны на ЭВМ. Спектр сигнала, отраженного от сапропеля, представлен на рис. 2.

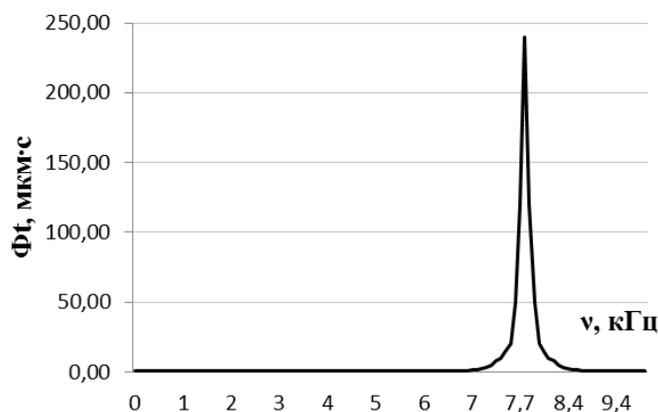


Рис. 2. Спектр импульса, отраженного от сапропеля

При отражении от сред с различными акустическими свойствами спектр отраженного сигнала значительно изменяется. Причем на изменение спектра оказывает влияние изменение как скорости звука, так и частотной зависимости коэффициента поглощения. Характерной особенностью изменения спектра зондирующего импульса является сдвиг основного максимума, а также его ширина. Уменьшение скорости звука в отражающем грунте вызывает смещение основного максимума спектра вправо, а увеличение показателя степени  $n$  в зависимости коэффициента поглощения от частоты смещает максимум спектра влево. Наибольший сдвиг наблюдается у сред с зависимостью

коэффициента от частоты вида (4), наименьший – от частоты вида (5). Спектры отраженных сигналов значительно уже зондирующего, то есть отражение идет практически на резонансной частоте отражающей среды. Длительность импульса при этом увеличивается.

Преломленный в среде импульс можно представить в виде

$$f_{\text{пр}}(t) = f(t)(1 - K)e^{-\alpha H},$$

где  $H$  – расстояние, пройденное преломленным импульсом в среде.

Спектральная плотность преломленного импульса определяется выражением

$$S_{\text{тпр}}(\omega) = \int_0^T (1 - ke^{-\beta t}) A \cdot \sin \omega_0 t \cdot e^{-\alpha H} e^{-i\omega t} dt.$$

Спектры преломленных сигналов при одинаковом модуле коэффициента отражения и на одинаковом расстоянии  $H=1$  м от границы раздела рассчитаны на ЭВМ и изображены на рис. 3.

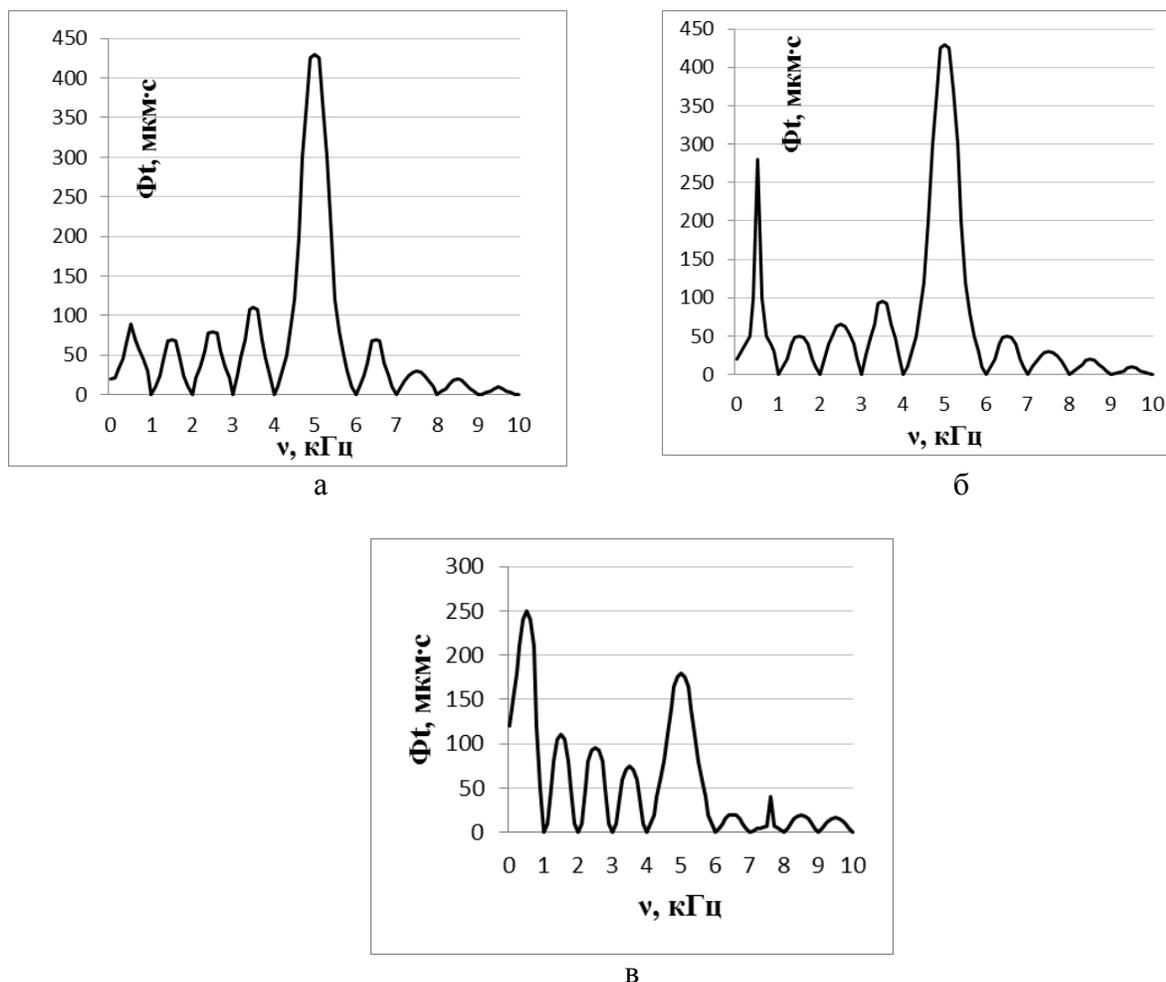


Рис. 3. Спектр импульса, прошедшего расстояние 1 м: а – в минеральном грунте (зависимость коэффициента поглощения от частоты моделируется формулой (4)) при скорости  $V = 2500$  м/с; б – в минеральном грунте (зависимость коэффициента поглощения от частоты моделируется формулой (3)) при скорости  $V = 2500$  м/с; в – в савропеле (зависимость коэффициента поглощения от частоты моделируется формулой (5)) при скорости  $V = 1500$  м/с

Как видно из рис. 3, спектр сигнала при прохождении через различные среды претерпевает значительные изменения, которые связаны с акустическими свойствами этих сред. Так как коэффициенты поглощения и затухания возрастают с увеличением частоты колебаний, можно предположить, что по мере распространения сигнала его высокочастотные составляющие будут ослабевать быстрее, чем низкочастотные. Рассчитанные спектры подтверждают это предположение. Причем чем в большей степени  $\alpha$  зависит от  $\omega$ , тем быстрее ослабевают высокочастотные составляющие.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Изучение особенностей изменения спектральной плотности отраженных и преломленных импульсов на границе раздела сред (например, вода – горная порода) открывает широкие перспективы. Так, уже сейчас можно утверждать, что применение узкополосного, а тем более настроенного на резонансную частоту приемника упругих колебаний, при звуколокации донных отложений водоемов малоэффективно, так как значительное изменение спектрального состава сигнала проходит уже на первой отражающей границе (вода – донные отложения); при распространении в донных отложениях в результате селективного поглощения максимумы спектральной плотности смещаются в сторону меньших частот.

В практической звуколокации с приемником, настроенным на резонансную частоту излучателя, иногда отмечалось «необъяснимое исчезновение» записи отражающей границы. Это «исчезновение» можно объяснить тем, что в результате изменения спектра сигнала при отражении на резонансную частоту приемника в этом случае приходится уже минимум спектральной плотности полезного сигнала.

Узкая четкая запись на эхограммах минерального дна (особенно песчаного) объясняется, с одной стороны, резкой акустической границей, то есть большой разностью волновых сопротивлений воды и песчаника, а с другой – тем, что песчаник, обладая зависимостью коэффициента поглощения от частоты вида (4), значительно воздействует на спектр преломленного сигнала. При этом быстро ослабляются высокочастотные составляющие.

В органических и органоминеральных донных отложениях при отсутствии загазованности условия для распространения преломленного импульса более благоприятные (в силу зависимости коэффициента поглощения от частоты вида (5)), поэтому сигнал проникает на большую глубину, о чем свидетельствует и запись на эхограммах звуколокационной съемки (наличие широких полос, на фоне которых иногда прослеживаются границы с подстилающими породами).

Таким образом, изучение спектров отраженных и преломленных сигналов при звуколокационной съемке озер и сравнение их со спектром зондирующего импульса дают возможность качественного, а в дальнейшем и количественного анализа (при достаточно большом количестве статистических данных) пород, слагающих дно озера. Практическое освоение этого метода позволит уже в полевых условиях без отбора проб для анализа иметь качественные или количественные характеристики пород.

Кроме того, зная, как изменяет спектр та или другая порода, можно повысить информативность результатов звуколокационной съемки при определении мощности отдельных слоев путем соответствующего изменения параметров приемного канала аппаратуры.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Макаренко Г.Л. Оценка ресурсного потенциала природных объектов на примере Тверской области: учебное пособие. Тверь: ТГТУ. 2004. 148 с.
2. Макаренко Г.Л., Рудя С.В. Георесурсное районирование озерных месторождений сапропеля (на примере Старицкого района Тверской области) // *Наука сегодня: теоретические аспекты и практика применения: Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции: в 10 ч.* Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком». 2011. Ч. 7. С. 90–93.
3. Гамаюнов Н.И., Яценко А.И., Иванов Г.Н. [и др.]. Применение звуколокации для разведки озер на сапропель и картирования донных осадков морского шельфа // *Разведочная геофизика: сборник статей. Вып. 72.* М.: Недра. 1976. С. 23–29.
4. Яценко А.И., Ильина Е.Д., Иванов Г.Н. Применение геофизических методов для изучения сапропелевых отложений в озерах // *Проблемы использования сапропелей в народном хозяйстве: Сборник статей.* Минск: Наука и техника. 1976. С. 55–62.
5. Методические указания по разведке озерных месторождений сапропеля / Е.Д. Ильина, Н.Г. Каблова, А.И. Яценко, Г.Н. Иванов. М.: [б. и.]. 1976. 114 с.
6. Воларович М.П., Яценко А.И., Иванов Г.Н. Исследование акустических свойств сапропелевых отложений // *Аппаратные и методические разработки в геофизике: Сборник статей.* Киев: Наукова думка. 1976. С. 24–33.
7. Иванов Г.Н. Исследование акустических свойств сапропелевых отложений в условиях естественного залегания // *Исследования торфяных месторождений: Межвузовский тематический сборник.* Калинин: КГУ. 1980. С. 33–39.
8. Сергеев Л.А., Алпатов М.Г. Определение грунта с помощью электронного осциллографа, подключенного к эхолоту. Наставление по примеру. Л.: Гидрограф. 1959. 132 с.
9. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Изд-во технико-теоретической литературы. 1957. 236 с.
10. Макаренко Г.Л. Прогнозная оценка качественных характеристик месторождений сапропеля водно-эрозионных озер методом звуковой геолокации // *Современные наукоемкие технологии.* 2014. № 3. С. 114–117.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

*ИВАНОВ Григорий Николаевич* – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры горного дела, природообустройства и промышленной экологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: ivanovgrigoriy@mail.ru

*КРИВЕНКО Ирина Валерьевна* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: krivenko-irina@mail.ru

*СМИРНОВА Марина Анатольевна* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информатики и прикладной математики, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: mar-smir@yandex.ru

*ИСПИРЯН Светлана Рафаиловна* – кандидат технических наук, доцент кафедры общей физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: ispirian-tstu@mail.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Иванов Г.Н., Кривенко И.В., Смирнова М.А., Испирян С.Р. Исследование изменения спектрального состава упругого импульса при отражении и прохождении через сапропель // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 4 (20). С. 97–105.

---

**RESEARCH CHANGES IN ELASTIC PULSE' SPECTRAL COMPOSITION  
DURING REFLECTION AND PASSAGE THROUGH A SAPROPEL**

*G.N. Ivanov, I.V. Krivenko, M.A. Smirnova, S.R. Ispiryan*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The current topic of increasing the capabilities of sonar survey of sapropel deposits is considered. Mathematical modeling of the spectra of reflected and refracted pulses has been carried out, taking into account the characteristic dependence of the absorption coefficient on the frequency characteristic of various types of mineral soils, since the study of the spectra of reflected and refracted signals arising from sonar sounding of its layers provides information about the quantitative and qualitative composition of the layer. As a result of computational experiments, the dependences of the intensity of such signals on the frequency were obtained, which make it possible to distinguish sapropel from other types of soil. It is indicated that the research results can be used to determine the power and quality of the underlying layers without sampling by appropriately changing the parameters of the receiving channel of the equipment and decoding the spectra of the above-mentioned signals.

**Keywords:** sapropel, mineral soils, seismoacoustic methods, sonar, mathematical modeling, dependence, absorption coefficient, frequency, spectrum, reflected signal, refracted signal.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*IVANOV Grigory Nikolaevich* – Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences, Associate Professor of the Department of Mining, Environmental Management and Industrial Ecology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ivanovgrigoriy@mail.ru

*KRIVENKO Irina Valer'ena* – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of General Physics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: krivenko-irina@mail.ru

*SMIRNOVA Marina Anatol'evna* – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics and applied mathematics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mar-smir@yandex.ru

*ISPIRYAN Svetlana Rafailovna* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of General physics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ispirian-tstu@mail.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Ivanov G.N., Krivenko I.V., Smirnova M.A., Ispiryan S.R. Research changes in elastic pulse' spectral composition during reflection and passage through a sapropel // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 97–105.

**УДК 616-092.4****РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ БИОТЕСТИРОВАНИЯ IN VITRO  
ЛИЗОЦИМСОДЕРЖАЩИХ СУБСТАНЦИЙ  
ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ПРЕПАРАТОВ  
С АНТИМИКРОБНОЙ АКТИВНОСТЬЮ**

*С.А. Смирнова<sup>1</sup>, И.А. Любкевич<sup>1</sup>, А.И. Зорин<sup>1,2</sup>, Е.А. Миронов<sup>2</sup>, В.П. Молчанов<sup>1</sup>*

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

<sup>2</sup>Научно-производственная фирма «Химмедсервис» (г. Тверь)

© Смирнова С.А., Любкевич И.А., Зорин А.И.,  
Миронов Е.А., Молчанов В.П., 2023

**Аннотация.** Представлены результаты разработки новой биотехнологической методики тестирования активности in vitro раствора фермента лизоцима, относящегося к классу гидролаз, и различных субстанций, производимых на его основе. В основу методики определения активности лизоцима положено его литическое действие на тест-культуру *Micrococcus Luteus*. Предложенная методика может быть использована на фармацевтических, биотехнологических и пищевых предприятиях для лабораторного контроля качества готовых препаратов, обладающих антимикробной активностью, а также в научно-исследовательской практике.

**Ключевые слова:** лизоцим, биотестирование, in vitro, литическое действие, *Micrococcus Luteus*, тест-культура, ферментативная активность, антимикробная активность, контроль качества.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-105-114**

**ВВЕДЕНИЕ**

Лизоцим (КФ 3.2.1.17) – антимикробный пептид, обладающий ферментативной активностью и положительным зарядом. Этот фермент относится к классу муреиновых гидролаз, переваривающих пептидогликан, содержащийся в бактериях [1].

Лизоцим содержит в активном центре два аминокислотных остатка, необходимых для катализа: глутаминовую кислоту в положении 35 и аспарагиновую в положении 52. Остатки глутаминовой (Glu35) и аспарагиновой кислот (Asp52) критичны для функционирования фермента, причем Asp52 ионизирован, а Glu35 нет [2, 3].

Фермент лизоцим известен также как мурамидаза, 1,4- $\beta$ -N-ацетилмурамидаза или N-ацетилмурамидгликангидролаза. Он обладает бактерицидным потенциалом в отношении различных патогенных бактерий. В процессе своей активности он биодegradирует клеточную стенку бактерий, катализируя гидролиз между N-ацетилмураминовой кислотой и N-ацетилглюкозаминном в пептидогликановом слое, являющимся основным.

Лизоцим играет важную роль в иммунной системе, в частности участвует в защите от бактерий и вирусов. У людей и животных он присутствует в слюне, слезной жидкости, молозиве, крови и других тканях. Иными словами, в организме человека и животных он выполняет защитную функцию, уничтожая бактерии путем разрушения их клеточных стенок [4].

Лизоцим, благодаря своей способности разрушать бактериальные клеточные стенки, находит широкое применение в различных сферах человеческой деятельности. Так, он эффективен в борьбе с бактериями, особенно теми, которые обладают грамположительной клеточной стенкой. Он может использоваться для лечения инфекций, таких как пневмония, бронхит, ангина, синусит и др. Наличие лизоцима в слезной жидкости помогает предотвратить инфекции глаз, так как этот фермент защищает роговицу и конъюнктиву. В слюне также присутствует лизоцим, который участвует в защите полости рта от бактерий и помогает предотвратить развитие кариеса и пародонтита [5, 6].

На основе рассматриваемого фермента в настоящее время производится препарат «Лизобакт», который обладает высокими лечебно-профилактическими свойствами и показан при острой и хронической форме воспалительных процессов слизистой оболочки полости рта и дыхательной системы [7]. Лизоцим может использоваться в пищевой промышленности для улучшения консервации пищевых продуктов, таких как сыры, мясные изделия и яйца. Он способен инактивировать определенные микроорганизмы и предотвращать их размножение.

Лизоцим содержится в некоторых косметических продуктах для ухода за кожей, таких как кремы и лосьоны, так как обладает антибактериальными свойствами. Он помогает предотвратить развитие акне и воспалений на коже. Добавляется в различные биологически активные добавки с целью повышения их эффективности. Лизоцим может применяться в системах очистки воды для борьбы с бактериями и предотвращения их размножения, что особенно важно при очистке воды для питьевого использования. Лизоцим может задействоваться в биотехнологических процессах, таких как производство фармацевтических препаратов и диагностических средств.

В основу предлагаемой уникальной методики определения активности лизоцима положено его литическое действие на тест-культуру *Micrococcus Luteus*. Лизоцим расщепляет пептидогликановую оболочку бактерий (гликозидная связь): под влиянием разности осмотического давления клетка разрушается, содержимое проливается в окружающую среду, оптическая плотность раствора падает.

Кинетика лизиса является главным фактором, определяющим методику эксперимента, точность, воспроизводимость, технологичность. В исследованиях Бухарина [6] упоминается 786 кривых, на основании которых делается заключение об активности препарата. Во всех исследованиях, включая фармакопейную статью, принимается, что лизис (изменение показаний прибора) микрококка происходит линейно.

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Реактивы: натрия фосфат 2-хзамещенный, 0,2 Н раствор соляной кислоты, лизоцим, дистиллированная вода, 2-хсуточная культура микрококка, фиксаналы для приготовления образцовых буферных растворов.

Оборудование:

пробирки 16x150,  
мерная колба 1000 см<sup>3</sup>,  
термостат 1ТЖ-0-03,  
спектрофотометр СФ-26,  
пипетки,  
секундомер,  
рН-метр рН-150.

Согласно стандартной методике готовится фталатный (рН = 4,01) и фосфатный (рН = 6,86) буферы, гидроокись кальция (рН = 12,45). рН-метр должен быть откалиброван до воспроизведения данных образцового фосфатного буфера с погрешностью не более 0,01.

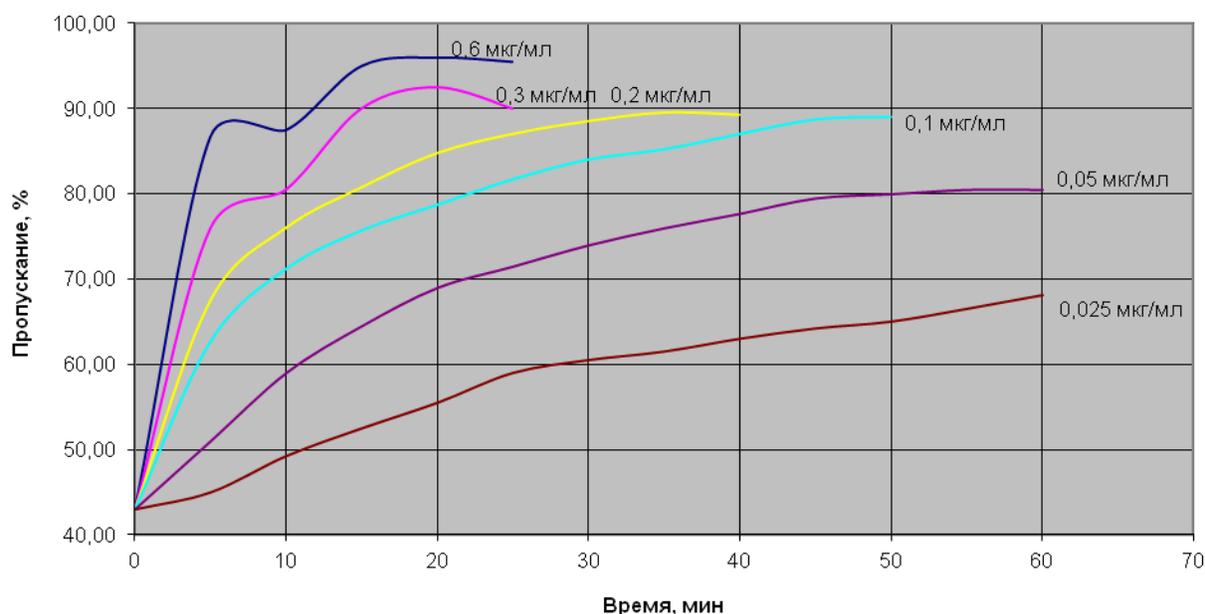
С использованием калиброванного рН-метра готовится 1/15 фосфатный буфер титрованием раствора фосфорнокислого натрия (23,87 г в 700–800 см<sup>3</sup> дистиллированной воды) раствором 0,2 Н соляной кислоты до рН = 6,99–7,01. Полученный раствор переносится в мерную колбу на 1000 см<sup>3</sup> и доводится до метки. Приготовленным буфером смывается 2-хсуточная культура микрококка, готовится взвесь с оптической плотностью около 50 %.

Навеска лизоцима массой 0,1487 г количественно растворяется в 50 см<sup>3</sup> дистиллированной воды. Из полученного раствора готовятся разведения с концентрациями: 6,0; 3,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 мкг/см<sup>3</sup>.

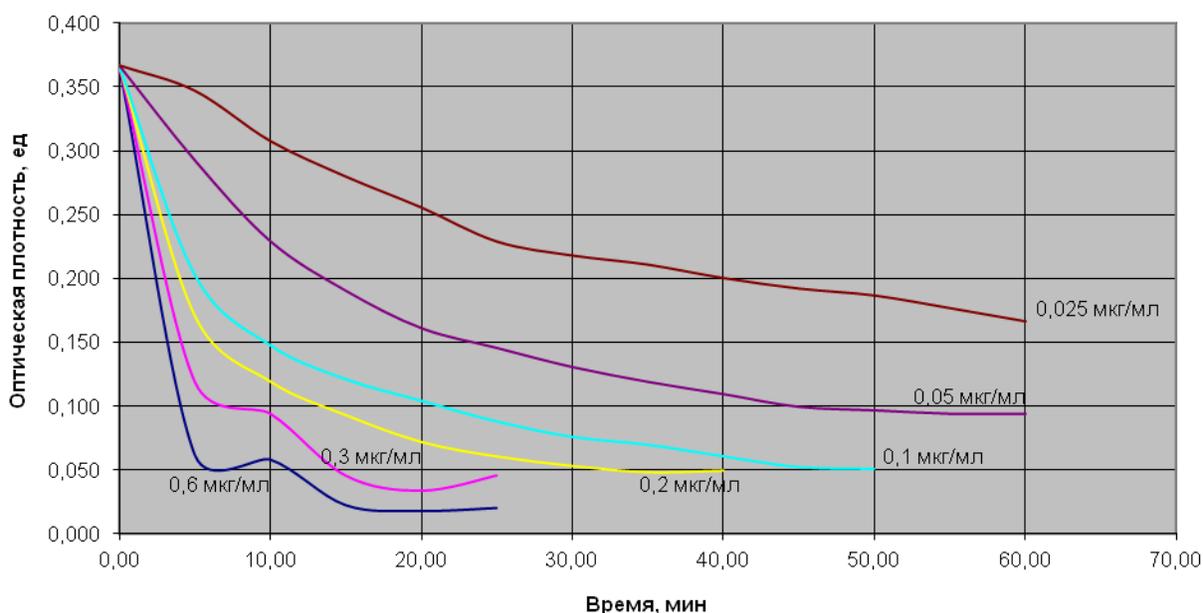
Условия для проведения анализа активности: длина волны, при которой проводится детектирование, – 540 нм; буфер 1/15 М (фосфатный). Лизис проводится при температуре 37 °С в 1/15 фосфатном буфере при рН = 7,0 при встряхивании. Пробу готовят разведением 1 см<sup>3</sup> исследуемого раствора до 10 см<sup>3</sup> субстратно-ферментативной смеси. Данные светопропускания снимаются при длине волны 540 нм в 1 см кювете на спектрофотометре СФ-26 по показаниям секундомера. Показания оптической плотности рассчитываются из показаний пропускания.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В ходе экспериментального тестирования разработанной методики анализа активности раствора лизоцима в вышеприведенных условиях на базе биотехнологической лаборатории кафедры биотехнологии, химии и стандартизации Тверского государственного технического университета и исследовательского сектора научно-производственной фирмы «Химмедсервис» были получены данные, представленные на рис. 1 (без сглаживания). Результаты показывают, что в исследуемом диапазоне изменение характеристик светопропускания во времени не линейно. Степень кривизны кинетической кривой зависит от активности раствора. Наибольшей линейностью обладают пробы с минимальным содержанием (активностью) лизоцима. Возможно, что линейная область данных находится в интервале значений оптической плотности, близких к 1 ед.



а



б

Рис. 1. Кинетика лизиса микрококка при различном содержании лизоцима: измерение по шкале пропускания (а); шкале оптической плотности (б)

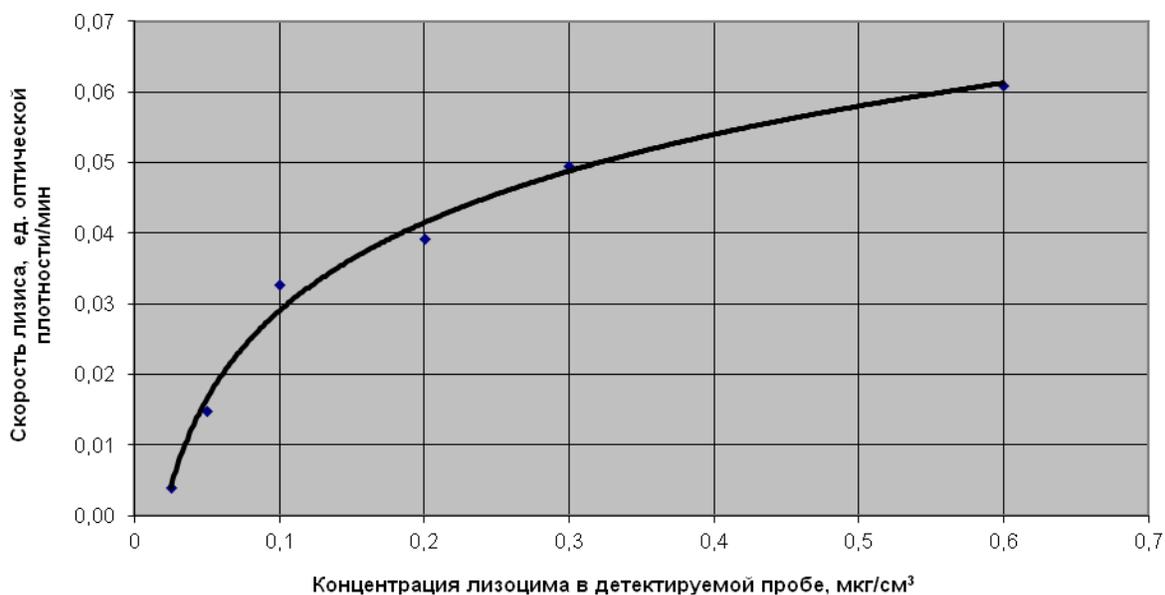
По кинетическим кривым, записанным с использованием автоматического потенциометра КСП-4, обнаружено, что последние могут иметь до двух хорошо фиксируемых точек перегиба. Наличие таких точек не следует считать артефактом, так как в работе субстратно-ферментативной системы возможно протекание следующих процессов:

на начальном этапе все частицы (микроорганизмы) целы и начинают интенсивно растворяться только после определенной степени деградации; на завершающих стадиях большинство из этих частиц «смято», но все еще лизируется, оптическая плотность продолжает медленно падать. В то же время, очевидно, что на процесс лизиса сильнейшее воздействие оказывают два диффузионных ограничения: по ферменту и по субстрату. Кроме того, кривые показывают, что имеет место частичное ингибирование фермента низкомолекулярными продуктами, вследствие чего реакция тормозится при значениях, которые не являются конечными параметрами лизированной взвеси.

Поскольку все эти моменты требуют тщательного изучения, целесообразно сопоставлять активность лизоцима с начальной скоростью лизиса, когда посторонние факторы выражены минимально или отсутствуют. Такой подход оправдан в свете замечаний Бухарина, Васильева о колебаниях светопропускания инициальных проб в период инкубирования [6]. Последний факт, по-видимому, связан с процессом коагуляции, выраженным при большой концентрации субстрата, когда агрегация клеток неизбежна.

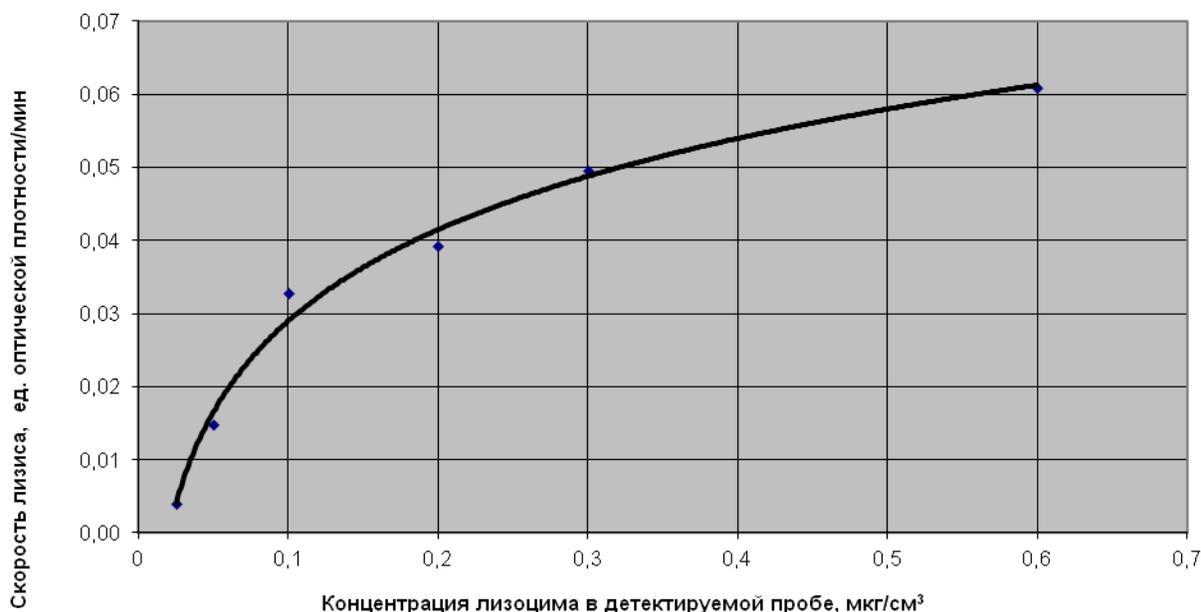
Для получения воспроизводимой методики необходимо связать начальную скорость лизиса с концентрацией или активностью препарата и определить пределы оптимальных концентраций фермента и субстрата, исключить влияние посторонних факторов: температурного коэффициента, ионной силы и т.д. Предпочтение было отдано минимизации времени исследования (инкубирования) пробы, так как полностью устранить процессы коагуляции, сильно выраженные во времени, невозможно.

На рис. 2 представлены зависимости начальной скорости лизиса от концентрации фермента в разных вариантах измерения.



а

Рис. 2. Зависимость найденной начальной скорости лизиса в зависимости от концентрации лизоцима по шкале оптической плотности (а); шкале пропускания (б)



б

Рис. 2. Продолжение

Из рис. 2а видно, что такая зависимость существует, но в данных условиях она не линейна. Последнее связано с очень высокой скоростью лизиса активных проб, обеспечивающей необходимую глубину в более короткий срок. В результате данные усредняются и показания активности (концентрации фермента) занижаются. Показания рис. 2б аналогичны. Определить оптимальный способ измерения изменения характеристик светопропускания необходимо при выявлении пределов возможной концентрации субстрата.

Скорость лизиса микрококка зависит от условий проведения эксперимента, концентрации субстрата, концентрации (активности) лизирующего фермента. Оптимальный диапазон концентраций субстрата составляет 40–60 % по шкале пропускания. Определение границы допустимого интервала концентраций (активности) лизоцима, в которых его можно анализировать, пользуясь данной методикой, было выполнено с учетом сохранения пропорциональности между содержанием лизоцима в пробе и скоростью лизиса микрококка. Для проведения данной серии экспериментов были приготовлены разведения раствора лизоцима так, чтобы при приготовлении субстратно-ферментативной смеси концентрация фермента составляла 0–0,1 мкг/см<sup>3</sup>, а скорость лизиса при максимальной концентрации лизоцима – не менее 5 %/мин. Разведения готовились последовательным разбавлением с модулем 1,50. Кинетика лизиса регистрировалась при выдерживании всех остальных условий на постоянном уровне в течение всего эксперимента. Температура окружающего воздуха и субстратно-ферментативной смеси 15,9 °С.

Кинетика лизиса микрококка снималась на спектрофотометре СФ-26 в кювете 5 мм без термостатирования. Для большей информативности данные лизиса фиксировались в течение 10 мин через каждые 0,25 мин исследования, далее – через 0,5 мин. Полученные экспериментальные данные были обработаны и представлены ниже:

Время, мин	Концентрация лизоцима в субстратно-ферментативной смеси, мкг/мл						
	0,058	0,087	0,130	0,195	0,293	0,439	0,658
	Пропускание, %						
0,00	50,90	50,80	51,20	53,00	53,00	54,30	54,00
0,25	51,10	50,80	51,50	53,50	53,90	55,70	56,00
0,50	51,10	50,90	51,50	53,90	54,70	56,80	57,70
0,75	51,20	51,00	51,80	54,50	55,40	57,90	59,50
1,00	51,40	51,10	52,20	55,00	56,20	59,00	61,30
1,25	51,50	51,30	52,50	55,50	56,90	59,90	62,50
1,50	51,70	51,40	52,80	56,00	57,50	60,90	64,50
2,00	52,00	51,70	53,50	57,00	58,80	62,60	66,50
2,50	52,30	52,10	54,10	57,80	60,00	64,10	67,50
3,00	52,60	52,30	54,60	58,70	61,10	65,50	68,90
3,50	52,90	52,60	55,20	59,40	62,20	66,70	70,00
4,00	53,30	52,90	55,80	60,20	63,20	67,80	71,10
4,50	53,50	53,20	56,30	61,00	64,00	68,70	72,00
5,00	53,80	53,50	56,80	61,70	64,90	69,60	72,80
5,50	54,10	53,80	57,30	62,40	65,70	70,40	73,60
6,00	54,40	54,00	57,80	63,00	66,30	71,20	74,30
6,50	54,60	54,40	58,20	63,60	67,00	71,80	74,90
7,00	55,00	54,60	58,50	64,10	67,60	72,50	75,40
7,50	55,20	54,80	59,20	64,60	68,10	73,00	76,00
8,00	55,50	55,20	59,60	65,10	68,70	73,60	76,50
8,50	55,80	55,40	59,90	65,60	69,20	74,10	77,00
9,00	56,00	55,70	60,30	66,00	69,60	74,60	77,40
9,50	56,30	55,90	60,70	66,40	70,00	75,10	77,80
10,00	56,50	56,10	61,10	66,90	70,50	75,50	78,20

На основании полученных данных определена линейная зависимость активности лизоцима от его концентрации, представленная в таблице и на рис. 3.

Начальная скорость лизиса пробы в зависимости от концентрации в ней лизоцима

Концентрация лизоцима в субстратно-ферментативной смеси, мкг/см <sup>3</sup>	Начальная скорость лизиса, %/мин
0,64	6,24
0,43	4,34
0,29	2,68
0,19	1,87
0,13	1,16
0,08	0,60
0,06	0,58

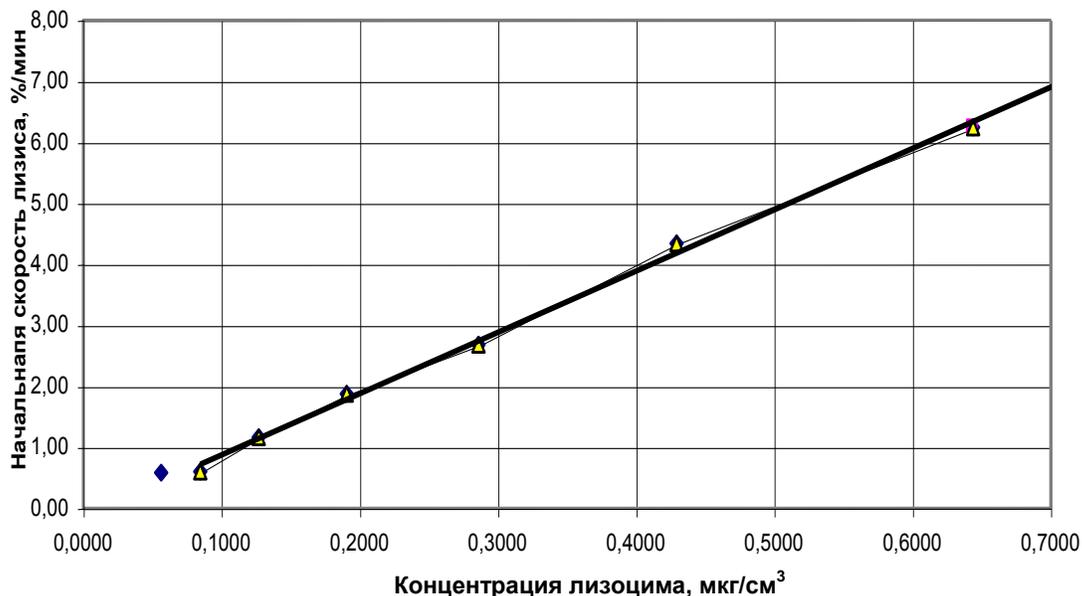


Рис. 3. Зависимость начальной скорости лизиса от концентрации лизоцима в детектируемой пробе

С увеличением концентрации лизоцима скорость лизиса микрококка растет пропорционально тангенсу наклона прямой –  $10,05$  ( $\% \cdot \text{см}^3 / \text{мин} \cdot \text{мкг}$ ). Нижний порог чувствительности метода ограничивается концентрацией лизоцима в пробе на уровне  $0,05$   $\text{мкг}/\text{см}^3$  (температура  $15,9$  °C), верхний предел концентрации фермента – нарушением соотношения субстрата и фермента при условии отсутствия ограничений в считывании данных кинетики лизиса. При этом анализировать пробы с активностью более  $5$   $\%/ \text{мин}$  затруднительно и вряд ли целесообразно.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования на базе биотехнологической лаборатории кафедры биотехнологии, химии и стандартизации Тверского государственного технического университета и исследовательского сектора научно-производственной фирмы «Химмедсервис» подтверждают возможность анализа активности *in vitro* раствора фермента лизоцима с использованием тест-культуры *Micrococcus Luteus*. Предложенная в работе уникальная методика биотехнологического тестирования является достаточно эффективной и может быть использована на фармацевтических, биотехнологических и пищевых предприятиях для лабораторного контроля качества готовых препаратов, обладающих антимикробной активностью, а также в научно-исследовательской практике. В ходе дальнейших исследований предполагается изучить применимость данной методики для изучения более широкого спектра антимикробных препаратов и антисептических средств.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2022-1232 от 13 октября 2022 года).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Duygu Ercan, Ali Demicri. Recent Advances for the Production and Recovery Methods of Lysozyme // *Critical Reviews in Biotechnology*. 2016. № 3, pp. 1078–1088.
2. Филлипс Д. Трехмерная структура молекулы фермента // *Молекулы и клетки: Сборник статей. Вып. 3* / под ред. М. Франка. М.: Мир. 1968. С. 78–90.
3. Варфоломеев С.Д. Химическая энзимология: учебник для студентов, обучающихся по специальности 011000 Химия и направлению 510500 Химия. М.: Академия. 2005. 239 с.
4. Lysozyme / ed. E.F. Osserman, R.E. Canfield, S. Beychok. New York: Academic Press. 1972. 641 p.
5. Muhammad Naveed, Yadong Wang, Xian Yin, Malik Wajid Hussain Chan, Sadar Aslam, Fenghuan Wang, Baocai Xu, Asad Ullah. Purification, Characterization and Bactericidal Action of Lysozyme, Isolated from *Bacillus subtilis* BSN314: A Disintegrating Effect of Lysozyme on Gram-Positive and Gram-Negative Bacteria // *Molecules*. 2023. № 28, pp. 290–301.
6. Бухарин О.В., Васильев Н.В. Лизоцим и его роль в биологии и медицине. Томск: Изд-во Томского ун-та. 1974. 209 с.
7. Никифорова Д.В., Пашаян С.А. Биологическое значение лизоцима // *Достижения молодежной науки для агропромышленного комплекса: Сборник LVI Научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Тюмень: ГАУ Северного Зауралья. 2023. С. 81–84.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**СМИРНОВА Софья Александровна** – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

**ЛЮБКЕВИЧ Ирина Александровна** – студент, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

**ЗОРИН Алексей Иванович** – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

**МИРОНОВ Евгений Алексеевич** – директор научно-производственной фирмы «Химмед-сервис», 170007, Россия, г. Тверь, ул. Лейтенанта Ильина, д. 1.

**МОЛЧАНОВ Владимир Петрович** – доктор технических наук, профессор кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: science@science.tver.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Смирнова С.А., Любкевич И.А., Зорин А.И., Миронов Е.А., Молчанов В.П. Разработка методики биотестирования *in vitro* лизоцимсодержащих субстанций для совершенствования технологий производства препаратов с антимикробной активностью // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 4 (20). С. 105–114.

**DEVELOPMENT OF METHODS FOR IN VITRO BIOTESTING  
OF LYSOZYME-CONTAINING SUBSTANCES TO IMPROVE THE PRODUCTION  
TECHNOLOGIES OF DRUGS WITH ANTIMICROBIAL ACTIVITY**

*S.A. Smirnova<sup>1</sup>, I.A. Lyubkevich<sup>1</sup>, A.I. Zorin<sup>1,2</sup>, E.A. Mironov<sup>2</sup>, V.P. Molchanov<sup>1</sup>*

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

<sup>2</sup> *Scientific and production company «Himmedservice»*

**Abstract.** The paper presents the results of the development of a new biotechnological methodology for testing the activity of an in vitro solution of the enzyme lysozyme, belonging to the class of hydrolases, and various substances produced on its basis. The methodology for determining the activity of lysozyme is based on its lytic effect on the *Micrococcus Luteus* test culture. The proposed technique can be used in pharmaceutical, biotechnological and food enterprises for laboratory quality control of finished preparations with antimicrobial activity, as well as in research practice.

**Keywords:** lysozyme, biotesting, in vitro, lytic action, *Micrococcus Luteus*, test culture, enzymatic activity, antimicrobial activity, quality control.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*SMIRNOVA Sofya Aleksandrovna* – Master's Degree Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

*LYUBKEVICH Irina Aleksandrovna* – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

*ZORIN Alexey Ivanovich* – Master's Degree Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

*MIRONOV Evgeny Alekseevich* – Director of Scientific and Production Company «Himmedservice» 170007, Russia, Tver, Lieutenant Ilyin str., 1.

*MOLCHANOV Vladimir Petrovich* – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: science@science.tver.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Smirnova S.A., Lyubkevich I.A., Zorin A.I., Mironov E.A., Molchanov V.P. Development of methods for in vitro biotesting of lysozyme-containing substances to improve the production technologies of drugs with antimicrobial activity // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 105–114.

**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*

Гулятьев В.И. – д.т.н., доцент ТвГТУ

*Ответственный секретарь*

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

*Члены редакционной коллегии:*

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

Белов В.В. – д.т.н., профессор ТвГТУ

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

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

Бронштейн Л.М. – к.х.н., с.н.с., химический факультет Индианского университета, 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  
№ 4 (20), 2023

Редакторы: С.В. Борисов, Ю.А. Якушева  
Корректор С.В. Зорикова

---

Дата выхода в свет 22.12.2023

---

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